中国科学: 地球科学 2019 年 第 49 卷 第 1 期: 26 ~ 65
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com





评 述 中国综合地层和时间框架专辑

中国寒武纪综合地层和时间框架

朱茂炎[1,2,3,4*], 杨爱华[4], 袁金良[1], 李国祥[1], 张俊明[1], 赵方臣[1], Soo-Yeun AHN[1], 苗兰云[1,3]

1. 中国科学院南京地质古生物研究所, 现代古生物学和地层学国家重点实验室, 南京 210008;
2. 中国科学院生物演化与环境卓越创新中心, 南京 210008;
3. 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049;
4. 南京大学生物演化与环境科教融合中心, 南京 210046
* E-mail: myzhu@nigpas.ac.cn

收稿日期: 2017-11-06; 收修改稿日期: 2018-10-09; 接受日期: 2018-10-24; 网络版发表日期: 2018-11-29
国家自然科学基金项目(批准号: 41672029、41661134048)和中国科学院战略性先导科技专项B类项目(编号: XDB18000000、XDB10010101)资助

摘要 寒武纪是显生宙第一纪, 见证了动物的爆发式快速演化过程, 标志着地球从微生物为主导的前寒武纪生态系统转变为以动物为特征的显生宙生态系统. 然而, 全球寒武纪地层对比困难, 高分辨率年代地层系统还未完全建立, 严重制约寒武纪地球-生命系统演化历史的研究. 文章简要介绍国际寒武系四统十阶年代地层系统的形成历史和已经建立的幸运阶、鼓山阶、古丈阶、排碧阶和江山阶的定义与"金钉子"(GSSP), 概述第二阶、第三阶、第四阶、第五阶和第十阶底界厘定工作进展, 重点阐述寒武系底界的全球对比问题, 以及寒武纪化学地层和同位素年代学的研究现状和存在问题. 在简要回顾中国寒武纪年代地层研究历史的基础上, 根据国际寒武纪年代地层研究进展, 对以华南为基础的中国寒武纪年代地层和时间框架进行了修订, 新建肖滩阶作为中国寒武系第二阶. 全面介绍中国华南、华北和塔里木三个主要构造地层分区寒武纪综合地层(生物地层、化学地层和同位素年代学)研究进展, 并对中国不同地层分区寒武系底部地层发育特征、底界识别和存在问题进行分析和讨论; 同时还对三个主要地层分区寒武系上部白云岩地层的划分与对比提出建议.

关键词 寒武系, 地层, 金钉子, GSSP, 地质年代学, 华南, 华北, 塔里木

1 概述

寒武纪作为显生宙第一个纪在地球历史中是一个标志性的地质年代, 最显著的特征是地球上首次出现了肉眼可见的复杂生命, 主要表现为动物在地球上的快速出现和爆发式演化, 标志着地球-生命系统发生了从前寒武纪以微生物为主导的生态系统向显生宙以动物为特征的生态系统的革命性转变. 寒武纪自1835年命名以来的100余年中, 一直被作为三叶虫的时代被世人所知. 但是在近半个世纪以来, 寒武纪研究取得突飞猛进的发展. 随着加拿大西部落基山脉布尔吉斯页岩动物群和中国滇东澄江动物群等在内的一系列寒

中文引用格式: 朱茂炎, 杨爱华, 袁金良, 李国祥, 张俊明, 赵方臣, Ahn S Y, 苗兰云. 2019. 中国寒武纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 26–65, doi: 10.1360/N072017-00370
英文引用格式: Zhu M Y, Yang A H, Yuan J L, Li G X, Zhang J M, Zhao F C, Ahn S Y, Miao L Y. 2019. Cambrian integrative stratigraphy and timescale of China. Science China Earth Sciences, 62: 25–60, https://doi.org/10.1007/s11430-017-9291-0

武纪特异埋藏化石群中发现各种熟知和疑难动物门类化石, 以及全球各地前三叶虫地层中多门类动物骨骼和外壳化石的大量发现等, 寒武纪不能再被简单地称为“三叶虫的时代”, 动物的“寒武纪大爆发”成为寒武纪最引人注目的标志. 随着寒武纪大爆发研究不断深入, 寒武纪地球演变历史也越来越多地被揭示. 目前所知, 寒武纪不仅发生了动物的快速大爆发, 也发生了多次大灭绝事件. 寒武纪还是地球上最重要成磷时期, 也是大气和海洋氧气快速增加的时期, 可能与寒武纪岩石圈演化过程密切相关. 因而, 寒武系研究一直是地球科学的前沿热点.

由于寒武纪是各门类动物在地球上的首次大爆发时期, 地层中动物化石地方性色彩明显, 广布性的浮游和游泳性生物分子如球接子类三叶虫直到寒武纪中期才开始出现, 而在古生代生物地层中发挥关键作用的真牙形刺化石在寒武纪晚期才开始出现, 导致寒武纪特别是寒武纪早期地层洲际对比困难, 全球寒武纪年代地层框架还未完全建立. 到目前为止, 寒武纪(系)10个世(阶)的底界还有近一半没有确定. 另外, 寒武系内部高精度同位素年龄缺乏. 寒武纪年代地层和时间框架研究的滞后严重影响了寒武纪地球和生命历史的研究. 本文目的是通过对全球寒武纪年代地层和时间框架研究进展总结, 指出当前国内外研究存在的主要问题, 为中国寒武纪地层研究和从事寒武系研究的相关科学工作者提供参考.

2　全球寒武纪年代地层和时间框架

2.1　历史回顾

寒武系是1835年由Adam Sedgwick依据英国威尔士北部地层建立的年代地层单位, 与同年在同一地区由Roderick I. Murchison建立的志留系有部分地层重叠(Sedgwick, 1852), 这个问题直到1879年Charles Lapworth在该地区建立奥陶系之后才得以解决(Lapworth, 1879). 现今的寒武系大致相当于Sedgwickd当初所建立的“下寒武统”中一部分. 寒武系自建系以来, 全球各地一直采用三分方案, 但缺乏统一的国际年代地层划分标准和时间控制. 直到国际地质科学联合会(IUGS, 下文简称地科联)1960年成立后组建国际地层委员会, 国际地质年代表这项工作才得以有效推动. 随着同位素年代学方法的建立和逐步成熟, 寒武纪三个世的时限在20世纪60年代就得到年龄控制(图1; Cowie, 1964). 为推动寒武纪年代划分, 1972年国际地层委员会成立了前寒武纪-寒武纪界线国际工作组在全球展开寒武系底界厘定工作. 在工作组成立之初寒武系底界就向下延, 以俄罗斯西伯利亚为代表的寒武系底部含有古杯和小壳化石的前三叶虫地层成为寒武系的一部分(Cowie和Glaessner, 1975). 寒武系底界的厘定工作直到1992年才结束, 加拿大纽芬兰岛幸运角(Fortune Head)剖面成为界线层型剖面, 以遗迹化石*Treptichnus pedum*在该剖面上的首次出现点位作为厘定寒武系底界的标志(详见Brasier等, 1994a).

在开展寒武系底界厘定工作的同时, 寒武纪内部进一步划分工作也在积极推进中. 早在1977年, Robison等就提出了寒武系进行统一级划分建议, 认为寒武系的统一级划分不应该受三分的限制, 需要考虑所有可能的划分标准建立寒武系统一级界线, 并提出了多个统级界线的参考点位(Robison等, 1977). 由Harland等推出的1982年版地质年代表(GTS 1982)首次将寒武纪三个世进行了命名, 并将寒武纪划分为7个期, 并给出了名称, 俄罗斯西伯利亚前三叶虫“托莫特期Tommotian”也正式作为寒武纪的第一期列入地质年代表. 1989版的地质年代表(GTS 1989)将下中寒武世进一步划分为5个亚世(Harland等, 1990; 图1).

1992年寒武系底界确定之后, 国际寒武纪地层分会(ISCS)积极推动寒武系内部年代地层划分研究. 自2000年开始提出了统和阶一级年代地层单位底界厘定的一系列潜在标准(Geyer和Shergold, 2000; Shergold和Geyer, 2003; Babcock等, 2005). 由于前三叶虫地层时限长, 生物明显区别于三叶虫出现后的地层, 在北美和华南分别有学者提出下寒武统需要二分, 将三叶虫出现之前寒武纪地层作为统一级地层单位, 分别提出了寒武系四统划分的方案, 命名了各自地区统一级的名称, 如北美劳伦大陆的4统7阶方案(Palmer, 1998a)、阿瓦隆尼亚(Alalonia)大陆的4统方案(Landing和Westrop, 1998)和华南4统9阶方案(Peng, 2003). 但在2004年的国际地层表上(ISC 2004), 寒武系采用的仍是3统6阶方案(Gradstein等, 2004). 也就是在2004年, 以华南寒武系新的年代地层框架为基础, 彭善池在韩国举行的寒武系再划分国际会议上提出了4统10阶的全球寒武系划分方案(Peng, 2004), 这个方案在2004年底由寒武

图 1　国际寒武纪年代地层和时间框架历史沿革

ICC, 国际年代地层表(International Chronostratigraphic Chart); ISC, 国际地层表(International Stratigraphic Chart); GTS, 地质年代表(Geological Time Scale)

系分会表决通过(Babcock等, 2005), 随即被国际地层表所采用(ISC 2005). 目前国际寒武纪年代地层4统10阶系统中, 纽芬兰统(含幸运阶)、苗岭统(乌溜阶)、鼓山阶、古丈阶、江山阶和芙蓉统(含排碧阶)的底界"金钉子"已经确立; 第十阶的厘定标准已经确定, 全球候选界线层型剖面也已经相继被提出, 金钉子的最后确立有可能很快完成; 而传统的下寒武统内部划分(第二阶、第三阶和第四阶)标准还未确定, 还有待进一步研究(图2)(见ICC 2018; Peng等, 2012a).

2.2　寒武系正式定义并已确定金钉子的阶

(i) 纽芬兰统Terreneuvian. 纽芬兰统是由地科联2007年批准作为寒武系第一统的正式名称(Landing等, 2007), 名称源自底界金钉子剖面所在地加拿大纽芬兰岛的现代法文名称"Terre Neuve"(古法文为Terre Neuffve). 纽芬兰统底界也就是寒武系底界, 与幸运阶底界一致.

(ii) 幸运阶Fortunian. 幸运阶是地科联2007年批准作为寒武系第一阶的正式名称(Landing等, 2007), 命

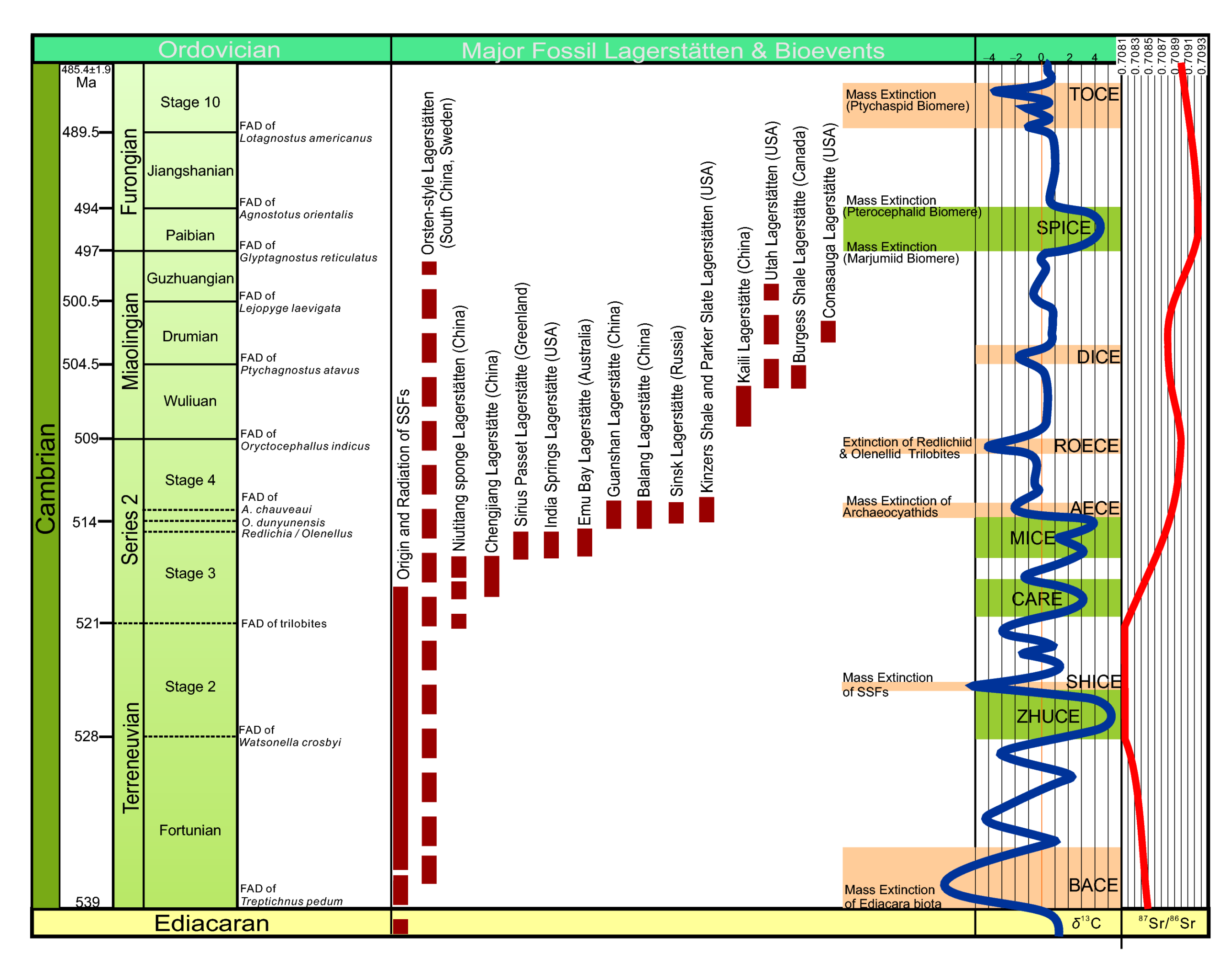


图 2 国际寒武纪年代地层、时间框架和生物事件

碳同位素曲线据Zhu等(2006a)修改; 锶同位素曲线引自Peng等(2012)

名地点和界线层型剖面位于地加拿大纽芬兰东南部Burin半岛的Fortune Head. 底界以遗迹化石*Treptichnus pedum* 的首现为定义, 位于界线层型剖面Chapel Island组第二段底界之上2.4m(Brasier等, 1994a; Landing, 1994). 幸运阶底界层型剖面和点位1992年8月得到地科联批准.

(iii) 鼓山阶Drumian. 由Babcock等2007年命名, 命名地点和界线层型剖面位于美国犹他州西部Millard县鼓山(Drum Mountains). 底界以球节子类三叶虫*Ptychagnostus atavus*的首现为标准, 位于界线层型剖面鼓山山脊剖面Wheeler组之内, 距该组底界62m(Babcock等, 2007). 鼓山阶底界的辅助对比标志包括碳同位素DICE事件、$^{87}Sr/^{86}Sr$同位素比值稳定变化期的开始点和一个海平面上升起始点(Babcock等, 2007). 鼓山阶底界层型剖面和点位2006年底得到地科联批准.

(iv) 古丈阶Guzhangian. 由彭善池等2009年命名, 命名地点和界线层型剖面位于湖南省古丈县罗依溪镇与永顺县王村镇之间沿酉水河S229省道边. 底界以球节子类三叶虫*Lejopyge laevigata*的首现为标准, 位于层型剖面花桥组之内, 距该组底界121.3m; 底界辅助对比标志是稍晚于球节子类三叶虫*L. calva*或者*L. armata*和牙形刺*Laiwugnathus laiwuensis*的首现(Peng等, 2009). 古丈阶底界层型剖面和点位2008年3月得到地科联批准.

(v) 排碧阶Paibian. 由彭善池等2004年命名, 命名地点和界线层型剖面位于湖南省花垣县排碧村. 底界

以球节子类三叶虫*Glyptagnostus reticulatus*的首现为标准, 位于层型剖面花桥组之内, 距该组底界369.06m; 底界辅助对比标志为碳同位素SPICE事件起始(Peng等, 2004). 排碧阶底界层型剖面和点位2003年8月得到地科联批准.

(vi) 江山阶Jiangshanian. 由彭善池等2012年命名, 命名地点和界线层型剖面位于浙江省江山县碓边B剖面. 底界以球接子类三叶虫*Agnostotes orientalis*首次出现为标准, 位于层型剖面华严寺组底界之上108.12m; 底界辅助对比标志为多节类三叶虫*Irvingella angustilimbata*的首现和碳同位素SPICE事件结束(Peng等, 2012b). 江山阶底界层型剖面和点位2011年8月得到地科联批准.

2.3 最新建立的寒武纪第三统和第五阶(苗岭统、乌溜阶)

寒武系第五阶底界即寒武系第三统的底界, 相当于传统三分寒武系的中寒武统底界, 是寒武系内部非常重要的界线之一. 三叶虫是寒武纪地层划分最主要的生物化石, 由于其地理分布受到生物地理区系的影响, 造成传统中-下寒武统界线定义在全球各地存在较大差异. 在中国以及东方动物群地理区(又称印度-太平洋Indo-Pacific生物地理区或南区)(卢衍豪等, 1974; Chang, 1980; 张文堂, 2006), 以东冈瓦纳地区为主, 包括亚洲南部、澳大利亚和南极, 传统中-下寒武统界线以莱德利基虫类(redlichiids)的消失和褶颊虫类(ptychopariids)的出现为标志; 在西方动物群地理区(又称北方-大西洋Boreal-Atlantic生物地理区或北区)(卢衍豪等, 1974; Chang, 1980; 张文堂, 2006), 包括北美洲、格陵兰、波罗地、东欧、西伯利亚和南美洲地区, 传统中-下寒武统界线以小油栉虫类(olenellids)的消失和奇异虫类(paradoxids)的出现为标志. 而实际上, 北美州主体部分劳伦大陆并没有奇异虫类的分布. 更加复杂的是在西冈瓦纳地区, 如摩洛哥、西班牙和法国南部地区, 典型的下寒武统小油栉虫类三叶虫与典型的中寒武世奇异虫类三叶虫混生(Geyer和Palmer, 1995). 早期三叶虫的这种古地理分区差异, 造成各大陆之间中-下寒武统界线的对比困难.

大约从20世纪70年代开始, 国际寒武纪地层分会就试图解决这一问题(Geyer, 1990). 破解这一难题的途径需要打破传统认识, 突破口是寻找不受古地理约束的、分布在深水陆棚和斜坡相的球接子类和掘头虫类三叶虫分子作为对比的标准化石. 直到2000年前后, 包括疑源类和多个三叶虫化石种或化石组合的首现被提议作为传统中、下寒武统界线的定义(Geyer和Shergold, 2000; Geyer, 2005). 其中, 最早由袁金良等(1997)提出的采用掘头虫类三叶虫*Oryctocephalus indicus* (Reed, 1910)的首现方案在2000年12月至2001年1月和2004年底至2005年初国际寒武纪地层分会举行的两次表决中获得多数支持, 成为定义传统中-下寒武统界线或者第三统第五阶底界的首选标准(Shergold和Geyer, 2001; Babcock等, 2005). 近20年的研究表明, *O. indicus*的首现可以很好地用于全球主要地区的对比(Zhao等, 2001a, 2012, 2014, 2017).

由于*O. indicus*在一些地区没有被发现, 如波罗地、西冈瓦纳和阿瓦罗隆尼亚(Avalonia)等地区, 早于*O. indicus*出现的另一个掘头类三叶虫*Ovatoryctocara granulata*的首现曾被建议作为定义第五阶底界的标准(Fletcher, 2001, 2003; Geyer, 2005). 实际上, *O. granulata*同样在波罗地和西冈瓦纳没有被发现, 分布地区并不比*O. indicus*广(Geyer, 2015; Sundberg等, 2016), 相比较而言*O. granulata*的方案并没有优势(Zhao等, 2014, 2017). 在*O. indicus*的首现作为第五阶的定义已经确定的情况下, *O. granulata*可以作为第五阶底界对比的辅助标志, 因为这两种在华南、西伯利亚和劳伦大陆都有发现, 可以通过与它共生的三叶虫化石解决对比问题(Sundberg等, 2016). 另外, 研究表明*O. indicus*的首现点与莱德利基虫类和小油栉虫类三叶虫的灭绝时间吻合(Zhao等, 2014), 一个全球性的碳同位素负异常事件(ROECE)被认为与这次三叶虫的灭绝事件密切相关(Zhu等, 2004, 2006a), 也可以作为另外一个辅助对比标志(Guo等, 2010; Gozalo等, 2013).

2016年7月国际寒武纪地层分会发出向全球征集寒武系第三统第五阶金钉子提案, 两份提案最终提交分会, 分别是中国贵州省剑河县八郎村的乌溜-曾家岩剖面和美国内华达州埃斯梅拉达郡(Esmeralda County)克莱顿山脊(Clayton Ridge)斯谱利特山(Split Mountain)剖面. 相比较而言, 贵州剑河县八郎村乌溜-曾家岩剖面优势明显: 剖面更加连续且化石丰富、界线点上下地层出露更加完整、交通便捷, 且位于得到国家法律保护的国家地质公园内. 在本文完成时, 乌溜-曾家岩剖面已经得到国际寒武纪地层分会选举委

员2/3以上的选票支持, 并在2018年6月得到国际地科联的正式批准成为寒武系第三统第五阶的金钉子剖面(IUGS E-Bulletin#144).

2.4　寒武系第十阶

寒武系第十阶是寒武系顶部最后一个年代地层单位, 其顶界与奥陶系底界一致. 在寒武纪晚期, 牙形刺类化石发生了从原牙形刺类经过副牙形刺类向真牙形刺类的快速演变. 真牙形刺类在寒武纪之后的古生代年代地层划分中发挥重要作用. 为此, Geyer和Shergold(2000)就曾提出真牙形刺类*Cordylodus proavus*带的底部可以考虑作为寒武系顶部阶的厘定标准. 这个方案在2000年12月至2001年1月国际寒武纪地层分会的表决中获得通过(Shergold和Geyer, 2001), 并成立了相应的国际工作组. 在2005年南京召开的第四届国际寒武纪地质大会上, Miller等人就曾依据这个方案提出以牙形刺*Cordylodus andresi* Viira & Sergeeva in Kaljo等(1986)的首现定义第十阶, 并建议美国犹他州西部Millard郡Ibex地区Lawson Cove剖面作为候选界线层型剖面(Miller等, 2005, 2006). 但是*C. proavus*带和*C. andresi*的首现层位太接近奥陶系底界, 为此早在2004年底国际寒武纪地层分会的表决中, 这个方案就被否定(Babcock等, 2005).

与此同时, 鉴于球接子类三叶虫在寒武系中上部地层国际对比中的优势, *Lotagnostus americanus*(Billings, 1860)和*Agnostotes orientalis*(Kobayashi, 1935)被提议作为芙蓉统内部划分的标准分子(Peng和Babcock, 2005). 其中, *L. americanus*的首现在2004年底通过国际寒武纪地层分会的表决成为定义第十阶底界的首选标准(Babcock等, 2005). 依据这个定义, 两条剖面先后被提议作为寒武系第十阶的界线层型候选剖面. 一条是俄罗斯学者Lazarenko等提议的位于西伯利亚东北部勒拿河下游的Khos-Nelege剖面, *L. americanus*的首现层位位于该剖面距Ogon'or组底339m处(Lazarenko等, 2011); 另一条是由彭善池等提议的湖南省桃源县瓦尔岗剖面, *L. americanus*的首现层位位于该剖面距沈家湾组底界29.65m处(Peng等, 2013, 2014). *L. americanus*和与之相似的球接子类最新系统分类学研究更加证实了*L. americanus*是一个特征明显的全球性分子(Peng等, 2015), 它的首现层位在全球各地几乎是同时的(Lazarenko等, 2011; Peng等, 2015), 进一步证实了*L. americanus*作为定义第十阶的标准分子的可靠性和实用性.

尽管采用牙形刺作为第十阶定义标准的方案早已被否定, 然而近些年来早于*C. andresi*的另一个牙形刺分子*Eoconodontus notchpeakensis*(Miller, 1969)又被有关学者提出作为定义第十阶的标准分子, 并提议美国犹他州西部House山脉Steamboat Pass剖面距Notch Peak组Red Tops段底1.3m的层位作为第十阶的金钉子点位(Landing等, 2011; Miller等, 2011, 2015). 同时, 在全球多个地区的*E. notchpeakensis*首现点之上记录了一次碳同位素负异常事件(HERB), 认为可以用于作为辅助对比标志, 成为选择这个提案的理由之一(Landing等, 2011; Miller等, 2011, 2015).

在湖南省桃源县瓦尔岗界线候选层型剖面上, 最新研究表明*L. americanus*的首现层位与牙形刺*Proconodontus posterocostatus*带底界一致(Bagnoli等, 2017). 从牙形刺生物地层对比来看, *E. notchpeakensis*的首现明显晚于*L. americanus*的首现, 中间还间隔一个牙形刺化石带(*Proconodontus muelleri*带). 由此可见, *E. notchpeakensis*首现层位还是太高, 与*C. andresi*存在的问题一样, 仍然非常接近奥陶系底界. 另外, 瓦尔岗候选层型剖面的碳同位素地层的全球对比则表明, 寒武系最顶部碳同位素出现至少3次负异常波动, HERB事件代表其中最晚的一次. 其中最早的一次负异常出现在*L. americanus*首现层位之上一点(Li等, 2017), 代表碳同位素在寒武纪晚期SPICE正异常事件之后负异常变化的开始. 由此可见, 以*L. americanus*的首现定义第十阶更加易于对比. 相比较而言, 湖南省桃源县瓦尔岗剖面是最具有竞争力的界线层型候选剖面.

2.5　寒武系未定义的阶

目前未定义的寒武系年代地层单位是下部两个统内的3个阶, 即第二阶、第三阶和第四阶. 长期以来, 这一段相当于传统下寒武统地层的划分和全球对比一直困扰着学术界(Palmer, 1998b; Geyer和Shergold, 2000; Rozanov等, 2008a). 如前文所述, 俄罗斯西伯利亚地区寒武系下部地层剖面出露好、化石丰富, 下寒武统自下而上建立了4个阶, 即托莫特阶Tommotian、阿特达班阶Atdabanian、波托马阶Botoman和托伊翁阶Toyonian. 其中, 托莫特阶和阿特达班阶很早就进入Holland等编著的地质年代表(GTS 1982; 图1), 得到广泛应用.

随着国际年代地层指南的实施(Cowie等, 1986; Salvador, 1994), 以西伯利亚单位层型定义的阶不符合界线层型的定义标准, 必须对传统下寒武统开展再划分工作. 在4统10阶的寒武纪年代地层系统正式建立的同时, 国际寒武纪地层分会在2005年南京召开的第四届寒武纪地质大会上, 组建了寒武系下部地层再划分国际工作组, 借此推进寒武系下部地层全球对比和第二阶、第三阶和第四阶的建阶工作. 由于西伯利亚和华南地区寒武系下部地层是全球发育最好、化石最丰富和研究程度最高的两个代表性地区, 因而成为寒武系下部地层再划分国际工作组开展工作的突破口. 为此, 工作组在2006年和2007年分别在南京和莫斯科召开两次寒武系下部地层再划分中俄双边研讨会, 在西伯利亚和华南寒武系下部地层的综合地层对比上取得了一些共识(Zhu等, 2007; Rozanov等, 2008b), 提出了寒武系下部地层再划分工作模型(Zhu等, 2008). 随后, 国际寒武纪地层分会在2009年成立了第二阶、第三阶和第四阶各自相应的国际工作组, 加强在全球各地的研究工作(Peng和Babcock, 2011). 经过7年的努力, 相关工作取得一些进展, 但在如何定义三个阶底界的问题上仍然没有获得共识. 以下对第二阶、第三阶和第四阶的研究现状做一简要介绍.

2.5.1 寒武系第二阶

寒武系第二阶底界的厘定问题实际上就是如何划分纽芬兰统. 纽芬兰统代表三叶虫出现之前的寒武纪地层, 大约跨越两千万年时间, 相当寒武纪1/3以上的历史. 在如何划分纽芬兰统的问题上, 首先需要考虑这段时间内生物演化问题. 这段时间内最显著的生物事件是全球性生物矿化事件大爆发, 地层中发现大量的微体动物骨骼和外壳化石(小壳化石). 而作为地球历史上最早的造礁动物, 古杯动物的出现和快速辐射就发生在纽芬兰世中期, 并伴随多门类小壳化石的首次出现, 代表了寒武纪大爆发的第一幕高峰. 在纽芬兰世中期发生的这一演化事件在俄罗斯西伯利亚地台寒武系下部地层中被很好记录下来, 以古杯化石首现和骨骼化生物大辐射为特征的这段三叶虫出现之前的地层被命名为托莫特阶(Rozanov等, 1969). 长期以来, 托莫特阶底界一直作为寒武系的底界, 直到至今仍被俄罗斯地层表所采用(Zhamoida, 2015). 托莫特期曾一度作为寒武纪最早的年代单位, 在20世纪80年代初期就在全球范围内被广泛采用(Harland等, 1982). 后来大量的研究表明, 在西伯利亚地台北部相当于托莫特阶之下的地层中仍然有大量小壳化石发现, 这套地层被命名为Nemakit-Daldynian阶(Missarzhevsky, 1989); 在中国华南地区, 梅树村阶下部不同面貌的小壳化石组合相当于托莫特阶地层之下(Qian等, 2001). 另外, 在西伯利亚、华南和纽芬兰地区, *Treptichnus pedum*的首现都出现在相当于托莫特阶地层之下的地层中(Zhu, 1997; Narbonne等, 1987; Rogov等, 2015). 所以, 托莫特阶的底界明显高于寒武系底界, 但是以古杯动物和多门类小壳化石的首次出现作为纽芬兰统内部划分的依据仍然不失为最佳方案.

由于古杯动物具有典型礁相动物的生态习性, 生活在温暖清澈的浅水环境中, 分布非常局限, 地方性色彩明显; 同时, 目前全球已知最早的古杯动物只出现在西伯利亚, 西伯利亚可能是古杯动物起源中心, 随后才逐步向其他地区扩散(Rozanov, 1992). 所以, 采用古杯动物首现进行跨区域地层对比是不现实的. 寒武纪早期小壳化石中的软体动物演化快、特征明显. 同时, 可能得益于软体动物具有长时间的浮游幼虫期, 它们的分布广泛, 具有跨区域地层对比的潜力(Gubanov, 1998, 2001; Gubanov等, 1999). 早在2006年, 我们就提出与托莫特阶古杯动物共生的软体动物*Watsonella crosbyi*的首现可以作为纽芬兰统内部划分标准, 并随后明确提出*W. crosbyi*的首现可以作为第二阶底界厘定的标准(Li等, 2011). 理由是*W. crosbyi*在西伯利亚、华南、纽芬兰、蒙古西部、法国和澳大利亚南部等地均有分布, 首现层位还与全球性碳同位素正异常事件(ZHUCE, Zhu等, 2006b)的底部非常接近, 可以作为辅助对比标准. 西伯利亚、法国南部和澳大利亚南部有关*W. Crosbyi*的最新研究支持了这个方案的可行性(Devaere等, 2013; Jacquet等, 2017; Kouchinsky等, 2017). 另外, 与*W. crosbyi*首现非常接近的还有一个软体动物*Aldanella attleborensi*, 它的地理分布也比较广, 也曾被提议作为第二阶底界厘定的标准(Parkhaev等, 2011, 2012; Steiner等, 2011).

寒武纪早期疑源类特征明显、具有地层对比潜力(Moczydłowska, 1991; Moczydłowska和Zang, 2006; Moczydłowska和Yin, 2012). 纽芬兰统已经建立两个疑源类化石带, 即下部的*Asteridium tornatum*-*Comasphaeridium velvetum*带和上部的*Skiagia*-*Fimbriaglo*-

*merella*带, 上带中典型分子*Skiagia ornata*在华南、澳大利亚南部、纽芬兰、欧洲西南部和波罗地等广大地区均有发现. 为此, Moczydłowska和Yin(2012)曾提出*S. ornata*的首现可以考虑作为第二阶底界厘定的潜在标准, 但是*S. ornata*的首现层位在不同地区差异较大, 有可能高于*W. crosbyi*和*A. attleborensi*的首现, 更接近三叶虫的首现(Moczydłowska和Zang, 2006), 这个问题还有待进一步研究澄清.

最近, 一些学者认为这个时期化石物种的首现(FAD)是不等时的, 采用FAD作为厘定年代地层界线的原则并不适用寒武纪早期地层划分, 提出应该采用非生物地层标准来划分和对比寒武系下部地层, 特别是碳同位素异常事件(Maloof等, 2010; Landing和Geyer, 2012; Landing等, 2013). Landing和Geyer(2012)曾建议以碳同位素ZHUCE正异常峰值作为第二阶底界厘定的标准, 并以中国云南会泽老林剖面为界线层型命名了“老林阶Laolinian”. 但是, Steiner等认为碳同位素地层只能采用变化趋势进行对比, 在如何选择碳同位素值变化确定GSSP点位上存在不确定性(Steiner等, 2013; Steiner和Yang, 2017). 实际上, 在采用碳同位素变化作为年代地层厘定标准已有先例, 古近系始新统底界就是很成功的范例. 这条界线点位选择在一个海洋和陆地环境下均有记录的全球性碳同位素负异常事件底部一个同位素值快速转折点上, 而不是同位素的绝对值(Aubry等, 2007). 所以, 无论是化石物种的首现还是碳同位素变化的转折点均可以作为年代地层的厘定标准, 关键是看哪种标准的全球对比更加实用. 需要说明的是, Landing等命名的老林阶是在第二阶底界厘定标准没有获得国际寒武系地层分会正式表决之前建立的, 属于无效名称.

在第二阶底界厘定标准还没有达成共识的情况下, 我们还是倾向于采用*W. crosbyi*的首现作为首选标准, ZHUCE正异常的底界作为辅助标准. 按照这个定义, 目前全球可供选择的界线层型剖面应该在俄罗斯西伯利亚地区和中国滇东地区. 在西伯利亚, 托莫特阶层型剖面所在的西伯利亚地台东南部地区, 托莫特阶底界普遍发育一个不整合面(e.g. Knoll等, 1995), 最好的剖面可能在西伯利亚地台北部, *W. crosbyi*的首现和伴生的碳同位素正异常事件I’(=ZHUCE)均低于传统的、以古杯化石*Nochoroicyathus sunnaginicus*首现为定义的托莫特阶底界(Landing和Kouchinsky, 2016; Kouchinsky等, 2017); 在中国滇东地区, 最好的界线层型剖面不在经典的晋宁梅树村地区, 而是在滇东北的会泽和永善地区, *W. crosbyi*的首现和伴生的碳同位素正异常事件ZHUCE位于朱家箐组大海段的底部(Zhang等, 1997; Li等, 2001).

2.5.2　寒武系第三阶

寒武系第三阶底界即寒武系第二统底界. 在寒武系4统划分方案正式建立时, 第二统底界是以三叶虫的首现来定义的(Babcock等, 2005). 前文已经多次指出, 寒武纪三叶虫地理分区明显, 在全球各地寒武系发现的最早三叶虫化石地方性色彩明显. 特别是, 很多古大陆的寒武系底部是不整合面, 明显存在地层缺失. 这些因素致使三叶虫在全球各地首现具有不等时性, 造成地层对比困难, 阻碍了第二统和第三阶底界GSSP建立工作的进度(Palmer, 1998b; Geyer和Shergold, 2000; Babcock等, 2005; Álvaro等, 2014; Zhang等, 2017).

目前, 全球出现最早的三叶虫化石可能是西伯利亚地台的*Profallotaspis jakutensis*和*Profallotaspis tyusserica*(Bushuev等, 2014), 美国西部Fritzaspis generalis和*Profallotaspis*? sp.(Hollingsworth, 2007, 2011), 以及摩洛哥的*Eofallotaspis tioutensis*和*Hupetina antiqua*(Geyer, 1996)等. 中国华南和澳大利亚最早的三叶虫化石*Parabadiella huoi/Abadiella huoi*也曾被认为是与前面几个地区最早三叶虫差不多同时出现的(Zhang, 1987; Zhang等, 2001; Yuan等, 2011). 尽管华南*Parabadiella*和澳大利亚*Abadiella*与摩洛哥的*Abadiella*异同和分类问题目前还存在不同意见(Jell, 1990; Zhang等, 2001; 林天瑞, 2015; Zhang等, 2017), 目前看来它们不是最原始的三叶虫, 出现的时间可能要晚于西伯利亚、美国西部和摩洛哥最早的三叶虫(Zhang等, 2017).

在三叶虫的首现作为第二统和第三阶底界厘定标准遇到困难的情况下, 是否存在其他生物化石作为标准分子的可能性呢? 从目前积累的材料来看, 在全球各地三叶虫出现的同时, 伴随着节肢动物金臂虫类、腕足类、叶足类微网虫等的出现; 一些小壳化石种的首现也具有厘定第二统和第三阶底界的潜力; 早于三叶虫出现的软体动物继续保持了快速演化和广泛分布的特点; 相比较而言, 软体动物*Pelagiella subangulata*潜力更大, 在华南、西伯利亚、纽芬兰、澳大利亚南

部等地相当于第三阶的地层中均有发现(Gubanov等, 1999; Steiner和Li, 2009; Steiner等, 2011; Betts等, 2016). 依据多种生物化石地层的综合对比, *P. subangulata*首现层位的差异较大, 但总体来看层位要稍晚于最早的三叶虫. 但是, 最近Betts等(2016)通过澳大利亚南部寒武系早期小壳化石地层对比研究, 认为该地区三叶虫*Abadiella huoi*的首现与西伯利亚、华南、摩洛哥、美国西部等地最早的三叶虫首现是等时的, 且作为第三阶的底界, 结果将广泛出现在其他地区晚于三叶虫出现的各种小壳化石(软体动物、腕足类、金臂虫、微网虫)和古杯化石作为纽芬兰统的化石. 如果Betts等(2016)的对比成立, *P. subangulata* 的首现则要稍早于最早的三叶虫. 但是, Betts等(2016)的对比与其他生物和化学地层的对比存在大量相互矛盾之处(Kruse等, 2017).

另外, 一种帽状疑难小壳化石*Mobergella*特征明显, 广泛分布在格陵兰、波罗地(瑞典和波兰)、西伯利亚、哈萨克斯坦、蒙古等地(Skovsted, 2003). 最近几年, 俄罗斯学者在西伯利亚地台东南部发现*Mobergella radiolata*的首现早于最早三叶虫*Profallotapsis jakutensis*的首现层位, 与西伯利亚阿特达班阶底部古杯化石*Retecoscinus zegabarti*带的底界接近. 考虑到*Mobergella*的广布性, Rozanov等俄罗斯学者提议*M. radiolata*的首现可以考虑作为第二统和第三阶底界厘定的潜在标准, 并以此为定义命名第二统为Yakutian统, 保留阿特达班阶作为第三阶的名称作为俄罗斯的地方性年代地层名称(Rozanov等, 2011; Demindenko等, 2012).

除了软体动物*P. subangulata*和帽状疑难小壳化石*M. radiolata*外, 在讨论第二阶时已经提到的疑源类化石*Skiagia*也可用于寒武系下部地层对比, 该属的两个种*Skiagia ornata*和*Skiagia ciliosa*都先后被认为可以作为第三阶底界的底界(Moczydłowska和Yin, 2012). 但总体来看, 非三叶虫生物化石种首现层位的等时性存在很大的不确定(Zhang等, 2017).

国际寒武系地层分会并不排除采用非生物的地层手段厘定寒武系第三阶底界(Babcock等, 2005). 2012年, Landing和Geyer在贵州召开的第17届寒武系再划分野外会议建议采用碳同位素为标准厘定第二阶底界同时, 提出可以依据西伯利亚地台东南部阿特达班阶下部碳同位素正异常事件IV的顶峰作为第二统和第三阶底界的厘定标志, 这个碳同位素正异常IV要高于三叶虫的首现层位. 他们还依据西伯利亚地台阿特达班阶层型剖面作为界线层型剖面命名了Lenaldanian统和Zhurinskyan阶, 作为全球寒武系第二统和第三阶的名称(Landing等, 2013). 然而, 西伯利亚阿特达班阶下部碳同位素正异常事件IV(=CARE, Zhu等, 2006a)的全球性识别还有待进一步研究, 主要原因是全球范围内同时代的碳酸盐岩地层并不普遍发育, 像华南和美国西部相当层位地层是碎屑岩地层. 由于Lenaldanian统和Zhurinskyan阶是在第二统和第三阶底界厘定标准没有获得国际寒武系地层分会的正式表决之前建立, 属于无效名称.

目前看来, 寒武系第二统和第三阶底界的厘定工作还任重道远. 与第二阶类似, 选择第三阶界线层型剖面时需要同时考虑生物地层和化学地层多个对比标准. 不过相比较而言, 西伯利亚和摩洛哥是解决这条界线的关键地区, 共同的优势是两个地区均发现最早的三叶虫化石, 含最早三叶虫地层的上下为一套连续的碳酸盐岩沉积序列, 可以开展化学地层研究.

2.5.3　寒武系第四阶

寒武系第四阶底界厘定实际上就是如何划分寒武系第二统. 与所有地质年代单位采取的基本原则一样, 在如何划分第二统的问题上首先需要考虑这段地层代表的时间段生物演化问题. 实际上, 无论从寒武纪还是整个地球历史上来看, 寒武系第二统记录的生物演化过程都可以称之为最精彩的篇章. 伴随三叶虫的出现, 几乎现代所有的动物基本造型(或者说门一级的动物类群)都在这个时间段已经出现在地球上, 因而寒武纪第二世代表了动物寒武纪大爆发的鼎盛时期. 随后, 寒武纪演化动物群发生了一次大规模的集群灭绝事件, 这次事件的灭绝率仅次于二叠纪末大灭绝(Benton, 1995). 这次大灭绝事件自第二世中期开始, 一直持续到第二世结束, 可划分出两个不同阶段, 第一幕被称为“申斯克事件(Sinsk event)”或古杯动物大灭绝事件, 第二幕被称为“霍克湾事件(Hawke Bay event)”或莱德利基虫类和小油栉虫类大灭绝事件(Zhuravlev和Wood, 1996; Zhu等, 2006a). 目前, 有关这个时期生物大灭绝事件发生机制的研究还没有得到广泛关注, 有可能与全球性大规模火山活动引起的大洋缺氧事件有关(Hough等, 2006; Jourdan等, 2014), 也有可能与全球性

的海平面下降和随后快速上升引起的海水环境变化有关，比如中国滇东发生在红井哨组和乌龙箐组之间的海退大规模事件，地中海地区(摩洛哥和伊比利亚半岛)的Leonian海退事件和波罗地地区霍克湾海退事件(Zhuravlev和Wood, 1996; Yuan和Ng, 2014; Nielsen和Schovsbo, 2015)．如果要将寒武纪第二世划分成两个阶段，第一幕大灭绝事件的开始可以作为重要的参考依据．第二世这样划分的话，第一阶段以动物大爆发为特征，第二世第二阶段以动物群大灭绝和快速更替为特征(Zhu等, 2008).

发生在第二世中期的第一幕大灭绝事件最显著的表现是曾经繁盛一时、多样性极其丰富的古杯动物几乎全部消失，三叶虫也发生了集群灭绝并伴随发生了类群的快速更替．由于当时三叶虫两大生物地理区的代表分子*Redlichia*和*Olenellus*是仅分布在第四阶的特征分子，且均在第四阶末灭绝，所以在寒武系4统10阶方案建立之初*Redlichia*和*Olenellus*首现就被建议作为第四阶底界参考标准(Babcock等, 2005)，随后又建议参考西伯利亚阿特达班阶/波托马阶界线附近的三叶虫*Judomian*和*Bergeroniellus*的首现(Babcock等, 2011; Peng等, 2012a)．但是，这些三叶虫分子属于典型的浅水相地方性分子, 跨区域对比潜力有限. 与这些经典的地方性分子相比，与它们层位接近的广布性盘虫类三叶虫可能具有更好的洲际对比潜力. 为此, Korovnikov (2012)依据西伯利亚波托马阶底界附近三叶虫化石分布, 提出盘虫类*Triangulaspis annio*和*Hebediscus attleborensis* 的首现可以第四阶底界标准.

不过，差不多在第二世中期的三叶虫更替过程中，适应深水的广布性掘头虫类三叶虫开始出现，表现出快速的演化，可以建立连续的演化序列，为第四阶的厘定提供了更好的选择(Yuan等, 2001, 2006, 2009; McNamara等, 2003)．彭善池等最早在2000年就提出以掘头虫类三叶虫*Arthricocephalus duyunensis*的首现作为华南斜坡相区相当于第四阶的都匀阶底界定义标准，后改为*Arthricocephalus chauveaui*的首现为标准(Peng, 2003)．尽管*A. chauveaui*具有全球性分布，对比潜力大, 但它的层位较高, 曾经考虑过作为厘定传统中下寒武统界线的标准分子(Geyer, 2005)．正因为这一点，袁金良等人建议比*A. chauveaui*更早出现的*A. jiangkouensis*首现作为都匀阶底界的标准分子(Yuan等, 2011; Yuan和Ng, 2014)，而这一最早出现的掘头虫类*A. jiangkouensis*最近被修订为*Oryctocarella duyunensis*(Peng等, 2017).

由此可见，三个三叶虫层位均可以考虑作为第四阶底界标准，但是它们的首现层位有差异．其中*Redlichia*、*Olenellus*、*Judomian*和*Bergeroniellus*首现层位最低, 与古杯灭绝和全球性海退时间面接近; *O. dunyunensis*与全球性海平面上升期相一致，*A. chauveaui*的首现相对较晚(Yuan等, 2011)．三种方案到目前为止都需要在全球主要地区开展深入研究，最后能否得到大多数同行的认可还有待观察．在选择三叶虫化石作为划分首要方案的同时，其他生物地层和非生物地层手段同样可以考虑．朱茂炎等就曾提出过可以考虑与古杯大灭绝事件相关的碳同位素AECE负异常事件作为参考标准(Zhu等, 2008), 就像第二阶和第三阶一样, 高精度碳同位素演化曲线与高精度生物地层之间的对比研究仍然缺乏. 因此, 第四阶建阶工作还需加强.

2.6　寒武系底界GSSP缺点与全球对比困境

自纽芬兰“Fortune Head”剖面1992年被地科联批准成为寒武系底界界线层型剖面以来(Brasier等, 1994a; Landing, 1994), 关于寒武系底界问题的争论就一直没有停止过(如Rozanov等, 1997; Zhu, 1997; Zhu等, 2001, 2003; Qian等, 2002; Peng和Babcock, 2011). 原因是作为确定寒武系底界的*Treptichnus pedum*是遗迹化石，遗迹化石与实体化石的最大不同是化石保存条件的明显差异．尽管实体化石和遗迹化石的保存都受到沉积岩相的控制，但与生物体保存化石的潜力主要受尸体的抗降解能力影响相比，遗迹化石是底栖生物在沉积物表面或内部活动的记录，保存主要受到沉积过程和沉积物表层水动力和化学条件的控制．而且新的研究发现，*T. pedum*在界线层型剖面下延至GSSP点位之下4m的位置(Gehling等, 2001)．更加致命的缺点是，界线层型剖面即缺乏同位素年龄又没有碳同位素化学地层等其他可以辅助的对比标志，无法起到全球对比作用，不符合界线层型的要求．由于篇幅限制，本文对纽芬兰的“Fortune Head”界线层型剖面存在的问题不能详细讨论．针对存在的问题，Landing等人试图对“Fortune Head”界线层型剖面的有效性进行辩护，并对*T. pedum*首现的寒武系底界定义进行修改，修改后的寒武系底界以*T. pedum*遗迹化石组合的底界为标志，换句话说在界线层型剖面上与*T. pedum*共生的复

杂遗迹化石组合为底界，这个底界以埃迪卡拉化石*Harlaniella podolica*和*Palaeopascichnus delicates*的末现点来联合界定，而不是以*T. pedum*首现点来界定(Landing等, 2013; Geyer和Landing, 2016; Buatois, 2017). 显然，修改后的定义是一个模糊的概念，也没有在界线层型剖面标定具体点位；同时强调了*H. podolica*和*P. delicates*末现点，但是它们在全球各地的分布局限, 时限也不明确, 无法依据这个定义在界线层型剖面之外的剖面上去识别界线，不符合国际地层指南对界线层型的要求. 且不说修改界线层型定义需要得到寒武纪地层分会的表决后再报国际地层委会和地科联批准才能生效，界线层型剖面上不仅*T. pedum*下延到GSSP点位之下4m，全球多地都发现复杂遗迹化石最早出现在埃迪卡拉纪的末期，与典型埃迪卡拉纪化石共生，如华南埃迪卡拉系灯影组中部(Chen等, 2013, 2018)，纳米比亚埃迪卡拉系Nama群(Jensen等, 2000; Jensen和Runnegar, 2005; Macdonald等, 2014). 近些年来，越来越多的证据表明埃迪卡拉纪与寒武纪生物群之间演化具有连续性(e.g. Smith等, 2016a; Yang B等, 2016; Zhu等, 2017a), 以复杂遗迹化石*T. pedum*作为寒武纪演化生物群的开始去定义寒武系底界的初衷已经无法成立.

正因为寒武系底界在全球各地的主要剖面上无法按照界线层型标准进行准确厘定，结果导致不同地质学家在全球不同地区采用的寒武系底界厘定标准不一. 如部分学者采用寒武系底部全球性存在的碳同位素负异常(BACE)的底部为标准，目前国际地层委员会最新版的地质年代表采用的年龄(541Ma)就是依据这一标准在阿曼的剖面上获得的(Amthor等, 2003; Bowring等, 2007)，因为BACE事件在全球各大区前寒武系-寒武系界线附近均有发现(Magaritz等, 1986, 1991; Zhang等, 1997; Kimura等, 1997; Zhu等, 2006a, 2017a; Kouchinsky等, 2007; Li等, 2009, 2013; Maloof等, 2010; Smith等, 2016a, 2016b)，与埃迪卡拉化石群的灭绝事件在时间上基本一致(Amthor等, 2003). 而俄罗斯学者和俄罗斯全国地层表仍然坚持使用在西伯利亚地区建立的寒武系下部年代地层标准，将托莫特阶底界作为寒武系的底界(Khomentovsky和Karlova, 2005; Rozanov等, 2008a; Zhamoida, 2015)；中国绝多数学者采用的标准是传统梅树村阶的底界，以小壳化石组合*Anabarites trisulcatus-Protoherzina anabarica*带底部小壳化石的首现为标准(钱逸等, 1996; Zhu, 1997; 张文堂和朱兆玲, 2000; Qian等, 2002; Zhu等, 2001, 2003). 由于全球范围内不同地区和不同学者寒武系底界定义采用不同的厘定标准，同时不同标准之间的相互时序关系没有建立，导致文献中关于寒武纪早期地质事件和生物演化解释上的相互矛盾和混乱.

鉴于"Fortune Head"界线层型剖面存在的问题, 国际寒武纪地层分会根据国际地层指南倡议重新开展寒武系底界的研究工作(Babcock等, 2014)，并在2012年澳大利亚布鲁斯班召开的第24界国际地质大会上征得国际地层委员会批准成立了"寒武系纽芬兰统幸运阶国际工作组", 目的是寻找其他可以广泛对比的地层标准，为重新定义或修订寒武系底界界线层型剖面和点位提供依据. 2015年在奥地利格拉斯召开的第二届国际地层大会期间，工作组对寒武系底界问题进行了专题讨论，提出了多个潜在对比标志，并指出各自存在的问题(Zhu等, 2015)，即(1) 遗迹化石*T. pedum*的首现, (2) 典型寒武纪小壳化石*Anabarites trisulcatus*和*Protohertzina anabarica*的首现, (3) 典型寒武纪疑源类*Asteridium-Heliosphaeridium-Comasphaeridium*(AHC)组合的首现, (4) 碳同位素BACE负异常事件, 以及相应层位的同位素年代学等. 优先需要解决的关键问题是4种潜在地层对比标志之间的先后时间关系. 下面就4个方面目前研究进展情况和存在的问题做一简要介绍.

(1) 遗迹化石*T. pedum*的首现. 目前全球不同地区发现最早的*T. pedum*层位相差太大, 如果采用*T. pedum*的首现进行对比，一些地区公认的典型寒武纪早期小壳化石将被置于埃迪卡拉纪. 例如，中国滇东地区梅树村剖面上，*T. pedum*最早出现在下磷矿层顶部, 明显位于富含小壳化石层之上(Zhu, 1997)；在俄罗斯西伯利亚地台，*T. pedum*最早出现同样明显高于小壳化石最早层位(Rogov等, 2015). 而在纳米比亚，*T. pedum*和与*T. pedum*相似的遗迹化石与典型埃迪卡拉化石共生(Jensen等, 2000; Jensen和Runnegar, 2005), 其他地区的*T. pedum*首现层位之下存在明显的地层不整合，与埃迪卡拉系或更早的地层呈不整合接触关系，如格陵兰和瑞典(Jensen, 1997; Jensen等, 2016).

(2) 小壳化石*Anabarites*和*Protohertzina*的首现. 具有完全矿化外壳和骨骼的小壳化石是动物寒武大爆发的标志性事件，全球分布广泛的钙质外壳化石*Anabarites*和磷质与磷质原牙形刺*Protohertzina*是寒武纪小壳

化石最早的代表性分子, 特征明显, 易于识别, 保存潜力大. 其中, *Anabarites trisulcatus*或*Protoherzina anabarica*的首现具有成为厘定寒武系底界标志的巨大潜力. 但是在西伯利亚、华南和哈萨克斯坦等地, 最新研究发现*Anabarites*与埃迪卡拉纪晚期典型的矿化骨骼化石*Cloudina*共生(Zhuravlev等, 2012; Yang B等, 2016; Zhu等, 2017a). 综合地层研究发现, *Cloudina*上延至碳同位素BACE事件的中部, *Anabarites*的最低层位低于BACE, 表明具有矿化骨骼的动物化石在埃迪卡拉纪-寒武系转折期时连续演化的(Zhu等, 2017a). 这些新的发现增加了*A. trisulcatus*或*P. anabarica*的首现成为厘定寒武系底界标志的不确定性.

(3) 疑源类*Asteridium-Heliosphaeridium-Comasphaeridium*(AHC)的首现. 寒武纪早期疑源类很早就用于地层对比, 并建立了4个化石带(Moczydłowska, 1991). 其中, 第一化石带*Asteridium tornatum-Comasphaeridiumvelvetum*带或*Asteridium-Heliosphaeridium-Comasphaeridium*(AHC)组合一直作为寒武系底部地层的标志, 在东欧地台、华南、塔里木、印度小喜马拉雅、南澳、西班牙和阿瓦隆尼亚(Avalonia)等地寒武纪底部地层均有发现(Ahn和Zhu, 2017及其中参考文献). 依据华南剖面的最新研究, AHC组合的首现接近BACE负异常最低峰, 稍低于小壳化石*A. trisulcatus-P. anabarica*带底界(Ahn和Zhu, 2017), 表明AHC组合可以作为厘定寒武系底界的重要参考标志. AHC组合的首现与小壳化石首现和BACE之间的这样时序关系还需要在全球其他地区的研究加以实证.

(4) 碳同位素BACE负异常事件. 如前文阐述, 全球埃迪卡拉系-寒武系过渡地层中普遍存在碳同位素BACE负异常事件(Zhu等, 2006), 在没有化石的界线地层剖面上可以作为寒武系底界的识别标志. 在2012年国际年代地层总结时, 无论是寒武纪地层分会还是埃迪卡拉纪地层分会也都将BACE作为寒武系底界标志, 存在的主要问题是寒武系底界的界线点置于BACE负异常的什么位置, 是放在BACE底部碳同位素负异常开始降低的位置(Zhu等, 2006; Peng等, 2012a)? 还是置于BACE负异常同位素值最低点(Narbonne等, 2012)? 另外, BACE与其他可用于寒武系底界厘定的参考生物标准分子之间的时间关系目前还不十分明确.

目前看来, 在上述生物地层标准无法达成共识的情况下, 以BACE作为寒武系底界识别标志还是应该作为首选参考标准(Zhu等, 2017b), 界线置于BACE负异常底部, 位于碳同位素从埃迪卡拉系一个稳定正值平台期(EPIP)向BACE负异常的转折点上(图2).

2.7　寒武纪化学地层

随着实验分析技术提高和普及, 包括碳、氧、锶同位素化学地层在地层划分对比中发挥的作用越来越大. 其中, 碳同位素化学地层学应用范围基本可以跨越整个地质年代(Saltzman和Thomas, 2012), 精度越来越高, 并成为古近系始新统的底界定义的标准(Aubry等, 2007); 尽管氧同位素化学地层学在前寒武纪地层划分和对比作用存在不确定性, 但古生代之后海洋生物骨骼的氧同位素在古海水温度重建、地层划分和对比中发挥着重要作用, 新生代晚期氧同位素地层精度甚至可以达到千年尺度(Grossman, 2012). 相比较而言, 锶同位素化学地层的精度不高, 但在寒武纪及其以前的地层中变化明显, 成为地层对比的重要参考标准(McArthur等, 2012).

就如前文所述, 碳同位素化学地层已经成为寒武纪地层划分和对比中不可或缺的手段. 寒武纪频繁的全球性碳同位素异常事件与生物辐射和灭绝事件密切相关, 具有成为厘定年代地层界线标准的潜力. 自2006年首条寒武纪全球碳同位素曲线发表以来(Zhu等, 2006), 碳同位素异常事件在寒武系划分和对比中得到广泛应用. 2012年, Saltzman和Thomas依据摩洛哥和北美西部资料发表了一条新的寒武纪碳同位素曲线, 与我们2006年的曲线相比, 区别不大. 根据10年来新的研究积累, 以及年代地层和同位素年代学的新进展, 我们认为2006年这条全球碳同位素曲线仅需要做一些小的修正(图2). 下面就修订后全球碳同位素曲线主要变化特征做一简要说明.

(1) 纽芬兰统碳同位素曲线在西伯利亚(e.g. Brasier等, 1994b; Kouchinsky等, 2007)、摩洛哥(Maloof等, 2010)、蒙古西部(Smith等, 2016b)和华南(Zhang等, 1997; Li等, 2009)四个地层发育最完整地区的不同剖面上差异较大. 综合地层对比表明, 纽芬兰统底部BACE负异常和第二阶下部ZHUCE正异常是全球性事件, 在寒武系底部地层对比中发挥着非常关键的作用. 但在西伯利亚西北部和蒙古西部的一些剖面上, BACE负异常和ZHUCE正异常之间记录了多达4次正

负异常的频繁波动, 碳同位素值的变化幅度在各地区也有明显差别, 地层对比困难, 即可能是当时全球海水变化的反映, 也可能是由局部地层剖面的差异和相变引起, 需要今后进一步详细工作加以论证.

特别需要指出的是, ZHUCE正异常在西伯利亚和华南大部分剖面上表现了为一个δ^{13}C值大于4‰的高峰. 但在西伯利亚西北部Sukharikha剖面上记录了两次δ^{13}C值均大于4‰的碳同位素正异常5p和6p(Kouchinsky等, 2007). 相似记录在摩洛哥的剖面上也有发现(Maloof等, 2010), 但与西伯利亚西北部Sukharikha剖面比较, 摩洛哥的剖面上5p和6p之间出现一个显著快速负异常(碳同位素^{13}C/^{12}C比值可低于−4‰), 与ZHUCE正异常之上的SHICE负异常变化幅度非常相似. 目前没有生物地层证据表明西伯利亚西北部Sukharikha剖面和摩洛哥剖面上的5p是否都可以与ZHUCE对比. 最新的研究表明, 在蒙古西部也记录类似的两次碳同位素5p和6p正异常(Smith等, 2016b). 但是, 这种对比与生物地层之间存在矛盾, 蒙古西部的6p有可能相当于第三阶, *Watsonella crosbyi*在5p下部地层中有发现, 表明有5p代表了ZHUCE正异常(Landing和Kruse, 2017).

(2) 第二统内碳同位素变化与同时期的生物演化具有两个阶段特征, 下部基本上以碳同位素正异常(CARE和MICE)为主, 之间有1~2次小的负异常波动, 与寒武纪大爆发的顶峰时期在时间上相对应; 上部以2次明显的碳同位素负异常(AECE和ROECE)为特征, 与古杯动物和莱德利基虫类/小油栉虫类两次大灭绝事件在时间上相对应(Zhu等, 2006).

(3) 第三统内碳同位素相对稳定, δ^{13}C值基本保持在0‰附近. 但在鼓山阶底界、古丈阶底界附近发生小的负异常. 其中, 鼓山阶底界附近DICE负异常相对较明显, 在全球多个剖面都有记录(Montañez等, 2000; Zhu等, 2004; Howley和Jiang, 2010; Pagès和Schmid, 2016). 而古丈阶底界附近小的负异常在美国西部表现较为明显(Saltzman, 2005), 但在中国湖南的界线层型剖面上却并不显著(Peng等, 2009).

(4) 芙蓉统下部碳同位素SPICE正异常几乎全球各大陆都有记录(Gerhardt和Gill, 2016及其参考文献), 与生物地层之间的对比高度吻合, 可用于高精度年代地层对比. SPICE正异常的底部与三叶虫大灭绝事件时间一致, 被认为与大面积大洋缺氧事件事件相关(Gill等, 2011), 随后又引起地球快速增氧, 从而促进了自寒武纪晚期开始的奥陶纪生物大辐射(Saltzman等, 2011).

(5) 在寒武系顶部, 最早由Ripperdan等(1992)在澳大利亚昆士兰西部发现了一个显著碳同位素负异常事件, 随后又在美国西部和南美阿根廷也有发现(Ripperdan和Miller, 1995; Buggisch等, 2003). 为此, 我们在2006年命名了一个碳同位素TOCE负异常事件, 这个负异常事件位于牙形刺*Eoconodontus*带, 与奥陶系底界接近. 需要特别指出的是, TOCE负异常在文献中与HERB负异常和SNICE负异常混用, 易引起混乱. SNICE负异常在2008年命名(Sial等, 2008), HERB负异常则由Ripperdan在2002年GAS年会的摘要提出, 实际上都与TOCE代表的是同一次事件. 按照地层单位命名优先律, 尽管HERB具有优先权, 但是Ripperdan (2002)的摘要中没有明确给出HERB的定义. 因此, 我们认为SNICE晚出异名, BERB为无效名称, 应该在今后避免使用. TOCE负异常δ^{13}C值的变化幅度具有明显的空间差异(4‰~1.5‰), 异常峰值在时空上也有一定变化范围(Miller等, 2011; Li等, 2017).

海水中锶同位素变化受地球内部岩浆活动和地表风化作用的控制, 因而海水中锶同位素随着地球的演化具有明显的阶段性特征, 可用于年代地层对比. 地球历史早期火山活动频繁, 前寒武纪海水的锶同位素组成主要反映了地球内源物质信息, ^{87}Sr/^{86}Sr比值非常低. 随着大陆地壳逐步形成与扩大, 风化作用对海水成分影响增加, 引起前寒武纪^{87}Sr/^{86}Sr比值总体呈快速增加的变化趋势, 在寒武纪晚期达到了地球历史上的最高峰, ^{87}Sr/^{86}Sr比值达到0.70925(Halverson等, 2007; Shields, 2007; McArthur等, 2012). 由于锶同位素^{87}Sr/^{86}Sr比值这种变化特征, 结合生物地层和碳同位素化学地层, 在寒武纪地层对比中可以发挥作用. 2012年, McArthur等和彭善池等对寒武纪锶同位素地层的应用进行了总结(McArthur等, 2012; Peng等, 2012a), 强调了如下几个锶同位素变化时间节点可以用于地层对比(图2):

(1) 寒武系底部的^{87}Sr/^{86}Sr比值延续埃迪卡拉系顶部的特征, 大约为0.70845; 随后在幸运阶开始下降, 在第二阶底部达到寒武系最低点(0.70805), 低的^{87}Sr/^{86}Sr比值是第二阶的典型特征.

(2) 第三阶底部开始, ^{87}Sr/^{86}Sr比值开始上升, 最高

达到0.70894; 在第五阶开始有小幅度下降.

(3) 古丈阶开始, $^{87}Sr/^{86}Sr$比值有开始新的一轮上升, 在排碧阶SPICE末期达到最高峰(0.70925); 随后在逐步缓慢下降, 在奥陶系底界$^{87}Sr/^{86}Sr$比值大约为0.70900.

2.8 寒武纪同位素年代学

2012年彭善池等对寒武纪同位素年代学研究进展进行详细总结(Peng等, 2012). 他们依据全球各地获得的高精度年代学数据, 通过广布性三叶虫演化速率平均值和化石带间隔时间, 给出了寒武纪各阶界线的年龄(参见2018版国际地层年代表). 近年来, 寒武纪同位素年代学研究主要进展集中在寒武系底部. 为此, 我们认为有必要对寒武系底界年龄问题进行讨论和说明.

目前国际地层年表采用的年龄541Ma来自阿曼Ara群A4C段蒸发岩-白云岩地层中的火山灰夹层锆石U-Pb CA-TIMS年龄. 该层火山灰最早报道的年龄为(542±0.3)Ma(Amthor等, 2003), 后来精度提高到(541.00±0.13)Ma(Bowring等, 2007), 经过最新矫正后的年龄为(541.00±0.29)Ma(Schmitz, 2012). Ara群A4C底部火山灰层位相当于碳同位素BACE负异常的底部, 高于埃迪卡拉纪末期典型骨骼化石*Cloudina*的灭绝面.

寒武系底界另外一个参考年龄来自纳米比亚南部Nama群顶部Spitskopf段上部的火山灰层U-Pb CA-TIMS年龄. 最早报道的年龄为(543.3±1)Ma(Grotzinger等, 1995), 经过最新矫正后的年龄为(540.61±0.67)Ma (Schmitz, 2012). Nama群顶部这个火山灰层与典型的埃迪卡拉纪软躯体化石共生(Grotzinger等, 1995), 而且位于埃迪卡拉纪末期碳同位素稳定正值平台期(EPIP)内, 明显低于BACE负异常层位(Wood等, 2015).

目前来看, 我们认为纳米比亚南部Nama群顶部(540.61±0.67)Ma比阿曼Ara群A4C段(541.00±0.29)Ma能够更好地限定寒武系底界. 因为Ara群A4C段上下为蒸发岩, 碳同位素BACE负异常底部记录不完整, 不排除存在沉积间断的可能. 另外, 最新的研究表明*Cloudina*可能延伸BACE负异常段(Yang B等, 2016). 而Nama群顶部Spitskopf段地层连续埃迪卡拉纪末期碳同位素稳定正值平台期(EPIP)记录完整(Wood等, 2015), (540.61±0.67)Ma层位明显低于BACE负异常, 且产有典型的埃迪卡拉化石. 尽管Spitskopf段顶部地层缺失, 相比较而言, (540.61±0.67)Ma应该目前寒武系底界的最大年龄. Spitskopf段最近发现更多的火山灰层, U-Pb ID-TIMS初步分析结果表明这段产有典型的埃迪卡拉化石的地层比(540.61±0.67)Ma更年轻(Linnemann等, 2017); 中国云南多个剖面灯影组和朱家箐组过渡地层火山灰的初步结果同样表明BACE负异常的底部火山灰年龄为540.7~539.6Ma(Zhu等, 2015, 2017b), 这些新的年代学表明寒武系底界应该接近和小于539.6Ma. 因此, 我们这里将寒武系的底界年龄从541Ma修改为539Ma(图2).

3 中国寒武纪年代地层和时间框架

3.1 中国寒武纪年代地层划分历史沿革

中国寒武纪地层研究最早可以追逆到19世纪末和20世纪初期, 由欧美学者对中国寒武纪地层与古生物的研究开始, 至今已有近140年历史(Richthofen, 1877; Dames, 1883; Bergeron, 1899; Monke, 1903; Walcott, 1905, 1906; Lantenois, 1907; Blackwelder, 1907; Deprat, 1912; Mansuy, 1907, 1912). 随后, 中国地质学先驱们在中国华南和华北两个主要地层分区开始了寒武纪地层研究, 奠定了中国寒武纪岩石地层划分的基本框架(如Lee和Chao, 1924; Sun, 1924, 1935; Ting和Wang, 1937; 王钰, 1938, 1945; Lu, 1941, 1945). 随着新中国成立后全国范围内区域地质调查大规模开展, 中国寒武纪地层的研究范围扩大到全国各个不同构造区块, 各区寒武纪地层剖面得到全面描述和研究, 地层划分和对比精度不断提高. 以此为基础, 在1959年北京召开的第一次全国地层会议上, 卢衍豪对中国寒武系进行了第一次系统总结, 提出了中国寒武系划分为3统8阶的年代地层系统, 即下寒武统分为筇竹寺阶、沧浪铺阶和龙王庙阶3个阶, 中寒武统分为徐庄阶和张夏阶2个阶, 上寒武统分为崮山阶、长山阶和凤山阶3个阶. 这个新提出的年代地层单位名称是由已有的岩石地层单位直接转化而来的, 包括随后使用的毛庄阶也源自毛庄组(卢衍豪, 1962). 差不多同时, 孙云铸(1961)提出了一套类似的、性质上基本上也属于岩石地层单位的3统9阶的寒武系年代地层系统. 由于孙云铸正式发表在先, 这个系统也被认为是最早建立的中国寒武系年代地层系统(见全国地层委员会, 2002). 但是文献中, 孙云铸的"馒头阶"和"汶水阶"很少得到应用, 而以卢衍豪提出的寒武纪年代及地层系统得到广泛应用, 并由此奠

寒武系	统	阶（自上而下）
中国寒武系年代地层（本文修改）	芙蓉统	485.4±1.9 Ma 牛车河阶 489.5 江山阶 494 排碧阶 497
	苗岭统	古丈阶 500.5 鼓山阶 504.5 乌溜阶 509
	黔东统	都匀阶 514 笻竹寺阶 520
	纽芬兰统	肖滩阶 528 幸运阶 539
中国地层表 2014	芙蓉统	485.4 Ma 牛车河阶 489.5 江山阶 494 排碧阶 497
	武陵统	古丈阶 500.5 王村阶 504.5 台江阶 509
	黔东统	都匀阶 514 南皋阶 521
	滇东统	梅树村阶 529 晋宁阶 541±1
彭善池, 2008（华南）	芙蓉统	488 牛车河阶 桃源阶 排碧阶 499
	武陵统	古丈阶 王村阶 台江阶 510
	黔东统	都匀阶 南皋阶 521
	滇东统	梅树村阶 晋宁阶 542
彭善池, 2000（华南）	湖南统	桃源阶 瓦尔岗阶
	武陵统	酉水阶 王村阶 台江阶
	黔东统	都匀阶 南皋阶
	滇东统	梅树村阶 晋宁阶
项礼文等,1980 张文堂等, 1980a	上寒武统	凤山阶 长山阶 崮山阶
	中寒武统	张夏阶 徐庄阶 毛庄阶
	下寒武统	龙王庙阶 沧浪铺阶 笻竹寺阶 梅树村阶
卢衍豪, 1962	上寒武统	凤山阶 长山阶 崮山阶
	中寒武统	张夏阶 徐庄阶
	下寒武统	（毛庄阶）龙王庙阶 沧浪铺阶 笻竹寺阶
孙云铸, 1961	上寒武统	凤山阶 长山阶 崮山阶
	中寒武统	汶水阶 张夏阶 当十阶
	下寒武统	馒头阶（龙王庙） 沧浪铺阶 笻竹寺阶 Salterella层

图 3　中国寒武纪年代地层和时间框架历史沿革

定了中国寒武纪年代地层的基本框架(图3).

随着滇东寒武系底部的前三叶虫地层建立梅树村阶(钱逸, 1977), 中国寒武系3统10阶的完整年代地层框架构建完成, 自下而上为: 下寒武统梅树村阶、笻竹寺阶、沧浪铺阶和龙王庙阶, 中寒武统毛庄阶、徐庄阶和张夏阶, 上寒武统崮山阶、长山阶和凤山阶. 这个划分方案在1979年北京召开第二次全国地层会议期间得到认可, 成为中国传统的寒武系划分标准, 并在1980年巴黎召开的第26届国际地质大会期间向国际地质学界推荐(图3; 项礼文等, 1980; 张文堂等, 1980a). 同时, 卢衍豪、张文堂、项礼文等也是按照这个3统10阶年代地层系统对中国20世纪80年代之前的寒武系研究进行了全面总结(Chang, 1980; 项礼文等, 1981; 卢衍豪等, 1982). 自此, 中国寒武系3统10阶的年代地层框

架在20世纪的最后20年得到普遍应用, 为中国寒武纪地质研究和矿产资源普查勘探做出了重要贡献.

鉴于中国传统寒武纪年代地层系统中的所有阶名均与岩石地层单位重名, 没有明确的定义, 为与《国际地层指南》(Salvador, 1994; Remané等, 1996)接轨, 卢衍豪等(1994)提出采取了保留阶名, 重名的岩石地层恢复使用已有组名或另建新名的建议. 为此, 罗惠麟等(1994)以昆明西郊筇竹寺关山脚下的黑林铺命名黑林铺组取代筇竹寺组, 沧浪铺组的红井哨段和乌龙箐段提升为组, 以昆明西郊山邑村附近为层型剖面新建山邑村组来代替龙王庙组, 随后陈均远等(1996)将原来筇竹寺组石岩头段和玉案山段提升为组, 从而解决筇竹寺组、沧浪铺组和龙王庙组与同名阶的重名问题. 同时期, 张增奇等(1994)恢复了Blackwelder(1907)在华北建立的馒头组(含后来分出的毛庄组和徐庄组)和炒米店组(含长山组和凤山组)原始定义, 从而解决了毛庄阶、徐庄阶、长山阶和凤山阶的重名问题. 而各阶的定义和底界层型剖面也逐步得到明确和修订, 参见1999年版《中国地层典——寒武系》(项礼文等, 1999)和2002年版《中国区域年代地层(地质年代)表说明书》.

由于中国传统寒武纪年代地层系统是分别根据西南(下寒武统)和华北(中上寒武统)浅水相区生物地层所建立的阶, 生物化石主要是地方性分子, 难以开展大区域和洲际对比. 为此, 在2000年南京召开的第三次全国地层会议前后, 彭善池等提出以华南斜坡相区寒武系生物地层为基础建立中国新的中晚寒武世年代地层系统, 建议以滇东地台相和湘西、黔东斜坡相地层为基础的华南4统9阶的年代地层划分方案(图3; Peng等, 1998; 彭善池, 2000; 彭善池等, 2000a, 2000b; Peng, 2003). 此后, 依据华南斜坡相寒武系年代地层研究, 以彭善池为主先后在华南建立了1统3阶(芙蓉统排碧阶、江山阶和第三统古丈阶)的全球界线层型剖面和点位(GSSP)(Peng等, 2004, 2009, 2012b). 据此, 彭善池(2008, 2009a, 2009b)又对华南寒武纪年代地层作了修订(图3).

实际上自2000年开始至今, 在科研和生产中, 中国寒武纪地层系统同时存在华南标准和华北标准. 尽管实践中华南系统在不同学者之间存在混乱, 但在2013年北京召开的第四次全国地层会议上讨论通过, 这个地层框架正式作为中国寒武纪区域年代地层标准被2014版中国地层表采用(图3; 王泽九等, 2014; 章森桂等, 2014). 现将以华南为基础的中国寒武纪年代地层系统中各阶具体定义简介如下(自上而下):

(i) 牛车河阶Niuchehean. 由彭善池2008年命名, 命名地点和界线层型剖面位于湖南省桃源县瓦尔岗. 底界以球接子类三叶虫*Lotagnostus americanus*的首现为标准, 位于层型剖面沈家湾组之内, 距该组底界29.65m(Peng等, 2014).

(ii) 江山阶、排碧阶和古丈阶. 是在华南建立的国际寒武系年代地层单位, 详见上文.

(iii) 王村阶Wangcunian. 由彭善池等1998年建立, 命名地点和界线层型剖面位于湖南省永顺县王村镇. 底界以*Ptychagnostus atavus*的首现为标准(彭善池, 2009a), 底界位于王村剖面花桥组底部(Peng和Robison, 2000).

(iv) 台江阶Taijiangian. 由彭善池等2000年建立(彭善池等, 2000a), 界线层型剖面位于贵州剑河县革东八郎乌溜-曾家崖, 名称来自作为界线层型剖面的八郎剖面原来所属地台江县. 台江阶底界以三叶虫*Oryctocephalus indicus*的首现为标准, 位于乌溜-曾家崖剖面距凯里组底部52.8m(Zhao等, 2001, 2012).

(v) 都匀阶Duyunian. 由彭善池2000年建立, 界线层型剖面位于贵州丹寨县南皋. 底界以*Arthricocephalus chauveaui*的首现为标准, 位于层型剖面第10层底之上25m处(张文堂等, 1979; Peng, 2003).

(vi) 南皋阶Nangaoan. 由彭善池2000年建立, 界线层型剖面选在黔东余庆小腮剖面, 底界以三叶虫类化石的首现为标准定义的. 层型剖面最早三叶虫为*Tsunyidiscus* sp., 出现在剖面第5层内(张文堂等, 1979).

(vii) 梅树村阶Meishucunian. 由钱逸于1977年命名, 阶名源自江能人等(1964)所建梅树村组, 命名地点和层型剖面均位于云南省晋宁县梅树村, 界线层型剖面位于云南省晋宁市梅树村小歪头山. 梅树村阶底界原始定义是以小壳化石的首现为标志(罗惠麟等, 1982, 1984). 尽管罗惠麟等(1994)为与国际寒武系底界定义接轨, 曾将梅树村阶底界置于小歪头山剖面第二小壳化石带*Paragloborilus-Siphogonuchites*带的底部. 2002年中国区域地层表说明书明确梅树村阶底界以小歪头山剖面第一小壳化石带*Anabarites trisulcatus-Protohertzina anabacica*组合的首现为标志. 长期以来梅树村阶的底界作为中国寒武系底界一直被广泛采用. 但

是, 彭善池(2008)采用罗惠麟等(1994)修订的梅树村阶底界定义, 以*Paragloborilus subglobosus*的首现为标准, 界线层型剖面为云南晋宁梅树村小歪头山剖面, 底界位于剖面第7层底部(上磷矿层内). 目前2014版中国地层表采用的就是这个标准.

(viii) 晋宁阶Jinningian. 由彭善池2000年建立, 层型剖面为云南晋宁梅树村小歪头山剖面, 底界与全球寒武系底界定义一致, 即以遗迹化石*T. pedum*的首现为标准. 根据梅树村剖面遗迹化石研究, *T. pedum*的首现层位位于小歪头山剖面第4层上部(下磷矿层顶部), 相当于小壳化石*A. trisulcatus-P. anabarica*带的中部(Zhu, 1997; Zhu等, 2001). 彭善池(2008)依据小歪头山剖面中谊村段中部(第5层)同位素年龄(~533Ma), 认为剖面上的*T. pedum*首现层位比全球寒武系底界GSSP剖面上*T. pedum*的首现层位高(彭善池, 2008). 因而, 晋宁阶底界在小歪头山层型剖面上没有明确的点位.

3.2 中国寒武系年代地层修订

依据国际年代地层规范和国内外最新研究进展, 我们认为有必要对中国2014年版寒武系年代地层和时间框架进行适时修订. 修订基于如下几方面原则: (1) 统和阶一级年代地层单位与国际年代地层表一致(王成源和彭善池, 2017); (2) 在国际年代地层表中没有确定的统和阶暂时使用中国对应的年代地层单位; (3) 中国年代地层单位定义需尽可能参考国际年代地层建议标准, 需要有明确的底界定义、界线层型剖面和点位.

目前国际寒武系已经建立了幸运阶、乌溜阶、鼓山阶、古丈阶、排碧阶和江山阶, 第十阶底界定义已经确定. 考虑到中国寒武系晋宁阶、台江阶和王村阶的定义与幸运阶、乌溜阶和鼓山阶一致, 故建议取消晋宁阶、台江阶和王村阶, 相对地滇东统也应由纽芬兰统替代, 武陵统由苗岭统替代. 而牛车河阶的定义与国际寒武系第十阶底界定义一致, 且有明确的界线层型剖面和点位, 没有修订的必要. 但是, 国际寒武系下部年代地层单位(第二阶、第三阶和第四阶)的定义没有确定, 如前文所述各阶底界均存在多个潜在标准(图2). 所以在全球界线层型剖面和点位没有正式确定之前, 为使用方便, 中国寒武系年代地层表下部三个阶的底界需要修订, 明确各阶定义、界线层型剖面和点位(图3).

(1) 都匀阶. 都匀阶做为中国寒武系第四阶, 原始定义是以*Arthricocephalus chauveaui*首现为标准. 如前文所述, 国际寒武系第四阶的底界仍然没有定义, 潜在的三个界线层位有时间上的差异. 其中, *A. chauveaui*的首现层位最高. 袁金良等人提出的、以早于*A. chauveaui*出现的*Oryctocarella duyunensis*首现为标准作为都匀阶的底界更加合适(Yuan等, 2011; Peng等, 2017), 因为*O. duyunensis*的首现更加接近第二世中期发生的古杯动物大灭绝事件或"申斯克事件(Sinsk event)"和碳同位素AECE负异常事件. 实际上, 在彭善池等对*Arthricocephalus*和*Oryctocarella*进行分类修订前(Peng等, 2017), 在华南寒武系过渡区和斜坡相区杷榔组下部及相当地层中出现的*O. dunyunensis*标本被鉴定为不同的属种, 有很多被定为*A. chauveaui*, 可靠的*A. chauveaui*标本出现在层位较高的杷榔组中上部(Peng等, 2017). 而彭善池2003年在指定都匀阶界线层型剖面时作为*A. chauveaui*的标本就是*O. duyunensis* (Peng, 2003, Figure 2B; Peng等, 2017), 但该标本不是产自都匀阶界线层型剖面的贵州丹寨南皋剖面, 而是产自贵州松桃黄莲剖面杷榔组下部(Zhao等, 2001b, pl.1, Figure 6). 由此可见, 将*O. duyunensis*的首现修订为都匀阶的底界与彭善池建立都匀阶的定义不矛盾(Peng, 2003). 故本文采用袁金良等人的意见(Yuan等, 2011), 对都匀阶定义进行修订, 底界以*O. duyunensis*的首现为标准. 由于袁金良等人并没有指定*O. duyunensis*首现的具体界线层型剖面和点位, 而贵州丹寨南皋剖面作为都匀阶的原始界线层型剖面上最早的*A. chauveaui*标本是否是*O. duyunensis*也不确定, 因此都匀阶的界线层型剖面和点位需要更多研究确定. 在目前情况下, 贵州松桃黄莲剖面可以临时性指定为都匀阶的界线层型剖面, 底界位于距杷榔组底之上37.6m处(Zhao等, 2001b).

国际地层年表中寒武系第四阶的年龄目前置于514Ma, 该年龄是来自英格兰西部寒武系下Comley砂岩组顶部的火山灰锆石U-Pb年龄. 这个层位相当于该地区的三叶虫*Callavia*带, 尽管与其他大陆的精确地层对比困难, 但在Avalonia地区*Callavia*带低于*A. chauveaui*的首现(Shergold和Geyer, 2003; Harvey等, 2011). 因而, 514Ma只能作为第三阶和第四阶界线的最大年龄(Harvey等, 2011). 考虑到*O. duyunensis*的首现与Avalonia地区*Callavia*带时间上可能更加接近, 也就是说514Ma 的年龄作为*O. duyunensis*首现年龄更加合适.

(2) 筇竹寺阶与南皋阶. 目前中国地层表(2014版)寒武系第三阶采用的是南皋阶. 南皋阶最早作为华南寒武系斜坡相的第三阶, 由彭善池2000年建立, 底界是以三叶虫类化石的首现为定义, 界线层型剖面选在黔东余庆小腮剖面. 实际上, 余庆小腮剖面位于扬子地台边缘过渡带, 而非斜坡带. 该剖面最早出现的三叶虫为*Tsunyidiscus niutitangensis*(张文堂等, 1979). 依据综合地层对比(Yang等, 2003; Zhu等, 2003; 杨爱华等, 2005), 华南斜坡相区最早的三叶虫为盘虫类*Hubeidiscus orientalis*. *H. orientalis*的首现层位不仅要晚于浅水相区盘虫类*T. niutitangensis*的首现, 更要晚于*Parabodiella huoi*的首现. *P. huoi*是目前为止中国发现最早的三叶虫(Zhang, 1987; Zhang等, 2001; Yuan等, 2011; Zhang等, 2017), 传统的筇竹寺阶底界就是以*P. huoi*的首现为定义的, 界线层型剖面为云南省晋宁市梅树村八道湾沟剖面, 底界位于距玉案山组底之上8.8m处(罗惠麟等, 1994; Zhu等, 2001). 鉴于国际年代地层标准中采用三叶虫的首现作为寒武系第二统和第三阶的厘定标准, *P. huoi*又是中国最早的三叶虫化石, 在国际寒武系第三阶没有建立的情况下建议中国年代地层标准中仍然采用筇竹寺阶. 如前文所讨论, *Parabodiella huoi*是中国最早, 但不是全球最早的三叶虫化石, 筇竹寺阶底界年龄应该小于国际地层年表的521Ma. 为此, 我们这里建议筇竹寺阶底界修改年龄为520Ma. 值得注意的是, 修订后的筇竹寺阶的时限上延至传统的沧浪浦阶中部, 顶阶以都匀阶底界为限.

(3) 肖滩阶(新建)与梅树村阶. 鉴于国际年代地层标准中目前采用软体动物化石*Watsonella crosbyi*或者*Aldanella attleborensis*的首现作为寒武系第二阶的厘定标准, 不管是梅树村阶原始定义和修订后的定义均不符合第二阶的厘定标准. 考虑到传统上中国梅树村阶的使用基本限于华南寒武系底部富含磷的地层(多为磷矿层), *W. crosbyi*或者*A. attleborensis*的首现层位明显高于这套地层, 仍然使用梅树村阶作为中国年代地层标准中显然不合适, 很容易出现混乱. 为此, 这里建议新建肖滩阶(Xiaotanian)替代传统的梅树村阶, 作为修订后的中国寒武纪年代地层中的第二阶, 底界以*W. crosbyi*的首现为定义, 以利于跨区域和全球地层对比. 界线层型剖面为云南永善县肖滩剖面, 底界与层型剖面上朱家箐组大海段底部一致(Li等, 2001).

值得注意的是前文已经对Landing和Geyer(2012)曾以中国云南会泽老林剖面为界线层型命名了"老林阶"作为国际寒武系第二阶进行了讨论, 认为其为无效名称. 同时, 老林阶底界是以碳同位素ZHUCE正异常峰值作为标准, 与以*W. crosbyi*首现为标准的肖滩阶定义不同. 所以, 新建的肖滩阶与老林阶不存在命名优选权的问题.

4　中国各大区寒武纪地层划分与对比

4.1　华南寒武系

中国华南寒武系广泛分布在扬子地台、江南斜坡和盆地不同沉积相区. 不同相区沉积地层序列、所含化石的类型和保存特征差异显著, 不同相区岩石地层对比难度较大. 总的来说, 华南寒武系地层研究近些年取得进展主要体现在两个方面, 即扬子地台区的纽芬兰统和斜坡相区的寒武系中上部地层. 扬子地台区纽芬兰统的研究进展包括修订和完善了小壳化石和古杯化石生物带; 斜坡相区的研究进展是建立了高精度三叶虫化石生物带, 国际寒武系年代地层表乌溜阶、古丈阶、排碧阶和江山阶的GSSP就建立在华南斜坡相区. 另外, 牙形刺生物地层和化学地层也取得新的进展. 图4是华南寒武纪年代地层和时间框架的总结, 简要说明如下.

4.1.1　生物地层

(i) 浅水相三叶虫生物地层. *Parabadiella huoi*是华南也是中国最早的三叶虫, 与之共生的有具有口唇的软舌螺类、最早的金臂虫类和典型的腕足类化石. 如前文所述, 在*Parabadiella*属一级名称没有共识的情况下, 为利于地层对比, 这里将原来常用的*Parabadiella*带修改为*Parabadiella huoi*延限带. *Wutingaspis-Eoredlichia*间隔带可以划分为两个亚带, 即下部的*Tsunyidiscus niutitangensis*亚带和上部的*Yunnanocephalus*亚带(Steiner等, 2001). 筇竹寺阶上部*Palaeolenus*和*Megapalaeolenus*被修订为*Palaeolenus lantenoisi*带和*Palaeolenus fengyangensis*带, 因为*Megapalaeolenus*被认为是*Palaeolenus*晚出异名(林天瑞和彭善池, 2009).

以滇东剖面为层型剖面的传统沧浪铺阶和龙王庙阶三叶虫化石带, 在文献中使用比较混乱和不统一. 首先, 在*Drepanuroides*带与*Palaeolenus lantenoisi*带之间, 贵州台地相区相当于明心寺组上部灰岩中很早就建立

了*Metarelichoides-Chengkouia*带和*Paokannia-Szechuanolenus*带，并可以广泛用于西南广大地区台地相地层的对比(周志毅和袁金良, 1980). 这两个带后来被袁金良和赵元龙(1999)改为*Paokannia-Ushbaspis*带. 但是, 该化石带在传统沧浪铺阶层型剖面所在的滇东地区并不存在(罗惠麟等, 1994), 故在传统的全国地层表和寒武系文献中一般不采用(张文堂和朱兆玲, 2000; 全国地层委员会, 2002). 我们认为滇东地区该化石带缺失可能是沉积相变造成的, 因为红井哨组上部主要由浅水粗碎屑岩组成, 化石稀少. 2014年版全国地层表上采用*Ushbaspis*带和*Szechuanolenus-Paokannia*带. 这两个带分子在不同剖面上有混生现象, 可以合并成一个带, 即*Szechuanolenus-Paokannia-Ushbaspis*组合带(Yuan等, 2011).

在浅水相区, 都匀阶的底界大约相当于*Palaeolenus fengyangensis*带的底界. *P. fengyangensis*带之上, 云南东部龙王庙阶层型剖面的山邑村组上部为白云岩, 化石稀少, 传统的全国地层表和文献通常只列出一个化石带, 即*Redlichia murakamii-Hoffetella*带(罗惠麟等, 1994; 全国地层委员会, 2002). 实际上, 在扬子地台西部浅水相区寒武系上部化石贫乏的块状白云岩(如娄山关群、洗象池群、三游洞群)之下与第二统之间的地层, 三叶虫化石相对较丰富, 如贵州中西部清虚洞组、高台组, 鄂西、川东地区的石龙洞组. 另外, 滇东山邑村组之上的陡坡寺组和双龙潭组也曾建立了三叶虫化石带. 其中, *Redlichia guizhouensis*带和*Paragraulos kunmingensis-Chittidilla plana*带均含有*Redlichia*, 应该属于都匀阶(Yuan和Ng, 2014). 而高台组*Kaotaia magna*带和陡坡寺组上部*Kutsingocephalu*带或*Sinoptychaparia*带中产有*Pegatia*, 且缺少*Redlichia*(周志毅等, 1980), 这个层位卢衍豪等(1982)曾建立一个*Kaotaia-Kutsingocephalu*带. *Kaotaia*在斜坡相和台地边缘相与*Oryctocephalus indicus*共生(袁金良等, 2002; 罗惠麟等, 2009). 因而*Kaotaia-Kutsingocephalu*带应该属于乌溜阶. *Kaotaia-Kutsingocephalu*带之上, 即滇东陡坡寺组之上双龙潭组建有*Protohedinia*带(罗惠麟等, 1994), 在扬子地台区相当于高台组和陡坡寺组相当层位之上的白云岩、灰质白云岩和鲕粒灰岩中的三叶虫分子中普遍含有*Proasaphiscus*(张文堂和朱兆玲, 2000), 建议建立*Proasaphiscus-Protohedinia*组合带, 以便于地层对比. 这个组合带内产有*Manchuriella*等三叶虫, 相当于鼓山阶下部(张文堂等, 1980b).

(ii) 斜坡相三叶虫生物地层带. 江南斜坡相区寒武系中上部连续沉积序列在湘西和黔东地区出露好, 化石丰富. 彭善池(2009a)系统总结华南斜坡相区寒武系三叶虫化石带, 自都匀阶开始至寒武系顶部建立了27个三叶虫化石带(图4). 掘头虫类*Oryctocarella dunyunensis*带目前置于都匀阶之下, 作为筇竹寺阶顶部化石带. *O. dunyunensis*带之下, 彭善池(2000, 2009a)列出了斜坡相区南皋阶4个三叶虫化石带, 主要依据的是在黔东地区建立的寒武系下部变马冲组和九门冲组的三叶虫化石带(周志毅和袁金良, 1980; 周志毅等, 1980; Lin, 2008). 其实, 除九门冲组顶部灰岩段中的*Hupeidiscus*外, 变马冲组和九门冲组的化石都来台地边缘相区, 如余庆、石阡、江口、岑巩一线, 而非斜坡相区. 就目前资料来看, 在丹寨、台江、岑巩、江口、松桃、花垣、古丈和张家界一线为界以东的斜坡相区, *O. dunyunensis*带之下, 只有九门冲组顶部灰岩段及其相当地层内产有*Hupeidiscus*. 如果将贵州江口、岑巩、松桃一线附近的台地与斜坡过渡区看做斜坡带, 那么这一带变马冲组产的*Szechuanolenus*和*Chengkouia*可以建立介于*O. dunyunensis*带和*Hupeidiscus*带之间的一个组合带, 即*Szechuanolenus-Chengkouia*带. 相当层位, 在湘西台地边缘区寒武系下部页岩中具有*Hunanocephalus*, 其层位与黔东对比不清楚, 林焕令(Lin, 2008)曾经命名*Hunanocephalus-Hupeidiscus*带, 置于*Szechuanolenus-Chengkouia*带之下.

斜坡相区黑色页岩中的含*Hupeidiscus*臭灰岩段沿江南斜坡带分布, 在下扬子地区的斜坡带也普遍存在, 可以作为标志层用于地层对比(杨爱华等, 2005). 但是, 斜坡相区这层臭灰岩之下没有发现其他三叶虫化石, *Hupeidiscus*是斜坡带发现最早的三叶虫化石. *Hupeidiscus*带之下的九门冲组黑色页岩一般发现有海绵动物、双瓣壳节肢动物、管状化石, 是浅水相筇竹寺阶典型化石(Yang等, 2003; 杨兴莲等, 2010). 九门冲组及其遍布斜坡相区的寒武系底部黑色页岩的近底部发现一层稳定的Ni-Mo多金属元素富集层. 这层Ni-Mo多金属元素富集层在筇竹寺阶底部的台地相区和台地边缘区普遍存在, 代表了一次标志性的古海洋事件, 是筇竹寺阶底界的参考标志(Zhu等, 2003). Ni-Mo多金属元素富集层曾经经过多次Le-Os同位素测年, 年龄为(521±5)Ma(Xu等, 2011). 上述生物和事件地层, 以及年代学

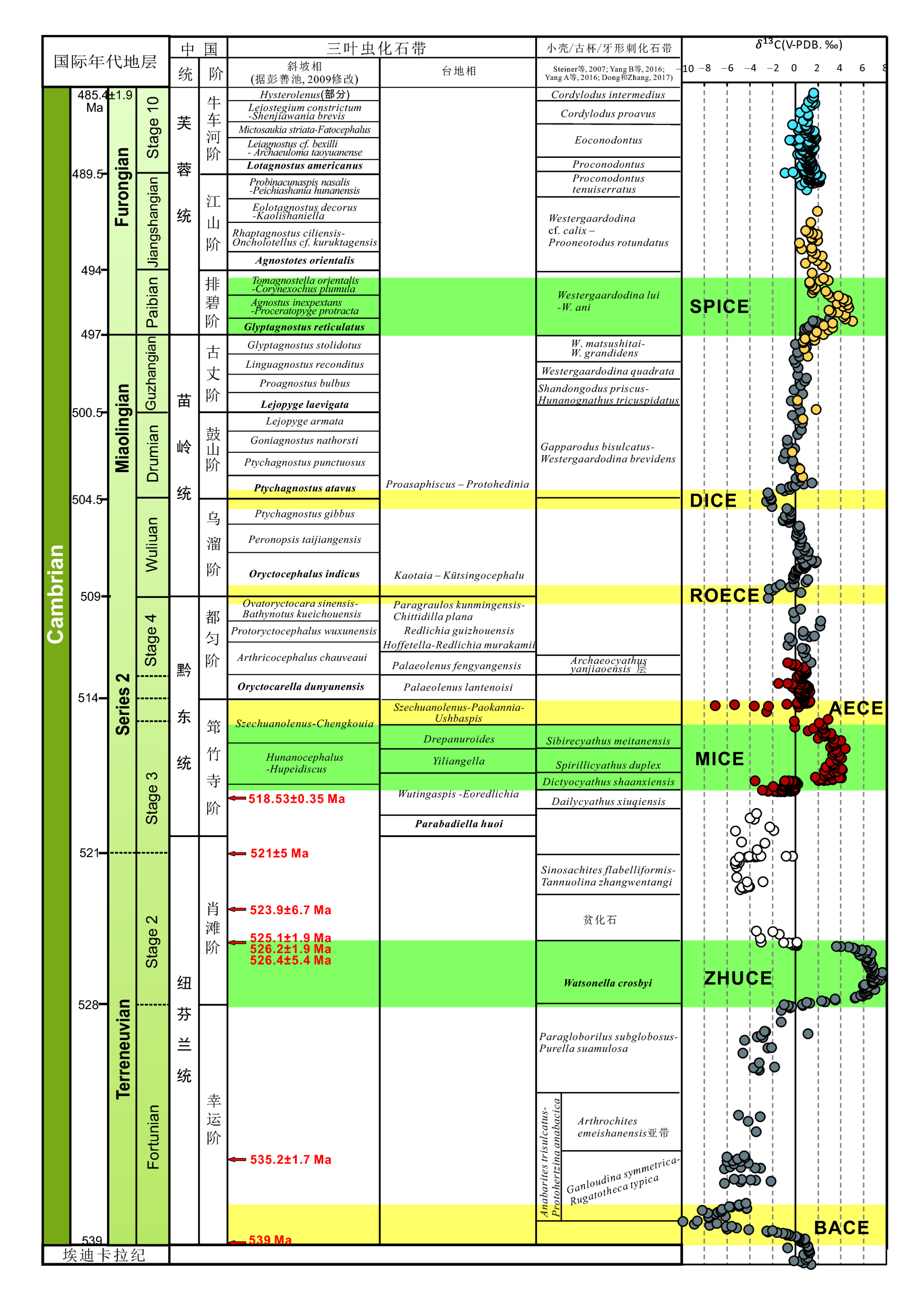


图 4　华南寒武纪地层表和时间框架

碳同位素据来自Saltzman等(2000)、Zhu等(2004)、Li等(2017), 以及作者未发表数据

证据均表明斜坡相区*Hupeidiscus*层位明显高于筇竹寺阶底界，层位相当于贵州浅水相区牛蹄塘组顶部和明心寺组, 以及滇东玉案山组顶部至红井哨组下部.

(iii) 小壳化石带. 扬子地台区寒武系含三叶虫地层之下与埃迪卡拉系灯影组白云岩之间普遍发育含磷地层, 富含小壳化石. 近20年来的研究, 前三叶虫的纽芬兰统可以划分4个小壳化石组合带(图4; 钱逸, 1999; Qian等, 2001; Steiner等, 2007). 其中第一组合带*Anabarites trisulcatus-Protohertzina anabacica*带可以划分两个亚带, 即*Arthrochites emeishanensis*亚带和*Ganloudina symmetrica-Rugatotheca typica*延限亚带, 其中*G. symmetrica-R. typica*亚带是最新发现, 位于寒武系富磷地层之下与灯影组白云岩之间的富硅质层段, 如滇东朱家箐组待补段底部、川中麦地坪组底部和陕南宽川铺组底部, 代表了华南最早的小壳化石, 接近碳同位素BACE负异常底部(Yang B等, 2016).

在扬子地台的筇竹寺阶下部也建立了小壳化石带, 即较浅水的*Pelagiella subangulata*延限带和较深水的*Rhombocorniculum cancellatum*和*Ninella tarimensis-Cambroclavus fangxiangensis*带(Steiner等, 2007). 另外, 在扬子地台边缘或斜坡近台地的深水相区寒武系底部含硅质层中发现了*Kaiyangites-Calcihexactina*小壳化石组合带(钱逸, 1999; Steiner等, 2007).

(iv) 古杯化石带. 华南寒武系古杯化石分布主要在上扬子地区的中西部黔东统, 最早的层位出现在贵州中西部的明心寺组, 相当于*Wutingaspis-Eoredlichia*带中部; 最晚出现在都匀阶底部相当于湖北三峡地区的天河板组. 在对华南古杯化石分类的系统修订和代表性剖面古杯化石地层对比基础上, 最近杨爱华等将华南古杯化石划分为4个带和一个层, 并建立了与三叶虫化石带的对比关系和国际地层对比(图4; Yang A H等, 2016).

(v) 牙形刺化石带. 华南寒武系牙形刺化石研究以湘西地区研究最为系统. 湘西地区处于斜坡相区, 自花桥组向上发育了连续的灰岩沉积地层, 延续至奥陶系下部. 该地区最早的牙形刺发现于花桥组底部(相当于鼓山阶底部). 董熙平等系统总结了这套地层中牙形刺的地层分布, 自鼓山阶底部至奥陶系下部共建立了13个牙形刺化石带, 其中11个带属于寒武系(Dong等, 2004). 除分类的修订和多样性增加外, 最新的研究进一步证明了 11个牙形刺化石带的稳定性, 并且牙形刺化石带与该地区高分辨率的三叶虫化石带具有明确的地层对应关系, 可以很好地用于区域和洲际地层划分与对比(图4; Bagnoli等, 2017; Dong和Zhang, 2017).

4.1.2 化学地层

华南寒武系化学地层研究始于20世纪90年代初期, 最早是采用碳同位素化学地层进行寒武系底界界线层型的研究(Brasier等, 1990). 经过近30年的研究, 华南寒武系碳同位素化学地层在地层划分和对比中发挥了重要作用. 图4构建了一条华南寒武系碳同位素化学地层变化曲线. 其中寒武系下部地层依据滇东北地区肖滩剖面; 肖滩阶上部至筇竹寺阶底部这段地层, 由于华南普遍是碎屑岩地层而缺少碳同位素数据; 筇竹寺阶中上部至都匀阶底部碳同位素来自贵州中部一套含古杯化石的地层; 都匀阶至寒武系顶部的碳同位素来自湘西地区(Saltzman等, 2000; Zhu等, 2004; Li等, 2017). 华南寒武系的碳同位素化学地层变化特征基本上反映了全球变化特征, 全球寒武系主要的碳同位素异常事件在华南基本上都有记录(图4), 可以很好地用于地层划分和对比. 例如, 左景勋等(2008)对黔北地区寒武系中上部碳酸盐岩开展的碳同位素化学地层研究, 发现了碳同位素AECE、ROECE和 SPICE 异常事件, 其中SPICE事件的发现不仅为解决该地区基本不含化石的娄山关群划分和对比提供了依据, 也为华南寒武系中上部贫化石的浅水白云岩地层的划分和对比提供了有效手段.

4.1.3 同位素年代学

华南寒武系同位素年代学研究集中寒武系下部地层中, 主要是在滇东地区和斜坡相区. 滇东地区经典的晋宁梅村村剖面记录了两层很好的火山灰, 中谊村段中部的火山灰锆石最新SIMS U-Pb年龄为(535.2±1.7) Ma(朱日祥等, 2009), 石岩头组底部火山灰锆石最新SIMS U-Pb年龄为(525.1±1.9)Ma(Compston等, 2008). 最近, 在云南澄江石岩头组底部火山灰锆石获得新的SIMS U-Pb年龄(523.9±6.7)Ma(Okada等, 2014), 玉案山组相当于澄江生物群的层位获得锆石ID-TIMS U-Pb年龄(518.53±0.35)Ma(Yang等, 2018). 由于这些年龄均来自具有很好生物地层和化学地层控制的剖面, 因而为相应的年代地层界线和生物环境事件提供了时间制约. 最近, 我们在滇东寒武系下部获得多层火山灰锆

石ID-TIMS U-Pb年龄(待发表), 其中在肖滩剖面BACE底部获得539Ma的年龄, 为修改寒武系底界年龄提供了依据(Zhu等, 2017b).

滇东地区之外的扬子地台区, 四川峨眉麦地坪剖面九老洞组底部火山灰层获得锆石SIMS U-Pb年龄(526.2±1.9)Ma(Compston等, 2008), 这个年龄与滇东梅树村剖面石岩头组底部的年龄比较吻合; 相似的年龄还有湖北三峡的岩家河剖面水井沱组底部锆石SIMS U-Pb年龄(526.4±5.4)Ma(Okada等, 2014). 另外, 贵州松林中南剖面牛蹄塘组底硅质岩底获得SHRIMP U-Pb年龄(532.3±0.7)Ma(Jiang等, 2009). 由于中南剖面牛蹄塘组底部具有明显的不整合, 小壳化石也不发育, 这个层位的年龄是否与滇东梅树村剖面中谊村段中部火山灰年龄相当, 还不确定.

近年来, 在扬子地台边缘与斜坡过渡相区埃迪卡拉系-寒武系界线剖面上获得一系列火山灰锆石SHRIMP U-Pb年龄. 这些年龄包括湖南张家界柑子坪剖面留茶坡组底部和上部年龄分别为(542.1±5)和(536.3±5.5)Ma(Chen等, 2009); 贵州江口坝黄留茶坡组上部和牛蹄塘组底部年龄分别为(542.6±3.7)和(522.3±3.7)Ma(Chen等, 2009, 2014); 贵州江口平引剖面留茶坡组顶部年龄(536±5)Ma(周明忠等, 2013); 贵州江口桃映牛蹄塘组底部(Ni-Mo富集层之下)年龄(522.7±4.9)Ma(Wang X Q等, 2012). 尽管这些年龄无法与浅水相区生物地层和化学地层建立联系, 但是对相应的岩石地层对比具有重要的价值. 主要体现在两个方面: 首先说明地台边缘与斜坡过渡相区埃迪卡拉系-寒武系过渡地层系列中的硅质岩段(留茶坡组和相当地层)是穿时的, 寒武系底界应该位于硅质岩层内部; 第二, 过渡相区牛蹄塘组的底界也是穿时的, 且应该老于522Ma. 这个结论也得到高于牛蹄塘组底界的Ni-Mo多金属元素富集层Le-Os同位素年龄(521±5)Ma的支持(Xu等, 2011).

4.2　华北寒武系

华北寒武系主要由浅水台地相沉积地层构成, 富含三叶虫化石, 是中国传统寒武系研究的经典地区, 中国传统寒武系中上部年代地层框架就是以华北寒武系三叶虫生物地层为基础建立起来的(卢衍豪, 1962; 项礼文等, 1981; 卢衍豪等, 1982). 而中国新的寒武系年代地层框架以华南斜坡相三叶虫生物地层为基础. 为构建寒武系新的年代地层框架, 彭善池(2009b)曾对华南斜坡相和华北浅水台地相三叶虫生物地层进行了初步对比. 但由于浅水台地相三叶虫基本上是地方性分子, 以斜坡相三叶虫为基础的寒武系年代地层框架与华北寒武系浅水台地相地层进行精确划分和对比仍然存在较多困难. 近些年来, 华北寒武系不仅在三叶虫生物地层取得一些新进展, 包括牙形刺在内的生物地层和碳同位素化学地层也获得新成果, 进一步完善了华北寒武系年代地层框架(图5). 下面对一些主要进展做简要说明.

4.2.1　生物地层

(i) 三叶虫化石带. 传统的长山阶建有4个化石带, 后来*Chuangia*带之下增加了*Prochuangia-Paracoosia*带(彭善池, 2009b), 这个化石带位于碳同位素SPICE正异常事件的底部, 芙蓉统和排碧阶的底界就位于这个化石带中部(Ng等, 2014a). 原崮山阶*Drepanura premesnili*和*Diceratocephalus armatus*带(朱兆玲等, 2007), 后改为*Neodrepanura premesnili*带(袁金良等, 2012). 依据张夏组和徐庄组三叶虫的系统分类和地层研究(袁金良等, 2012; 袁金良和李越, 2014), 将这个层位的三叶虫化石带划分的更加精细(图5), 但是其中的一些化石带在华北区域范围内的应用还进行验证.

毛庄组及其相当层位的*Shantungaspis aclis*带之下曾建有*Yaojiayuella ocellata*或*Probowmaniella jiawangensis*带. 依据淮南老鹰山剖面的研究, 两个带应该属于上下关系, 山西中条山的*Y. ocellata*与淮南的*Weijiaspis*带相当, *P. jiawangensis*带位于*S. aclis*带之下, 含有华南过渡区乌溜阶才开始出现的盘虫类*Pagetia*, 因而华北寒武系苗岭统和乌溜阶底界应该至于*P. jiawangensis*带底部(袁金良和李越, 1999).

华北地台寒武系最早的三叶虫发现于南缘的辛集组中*Estaingia*, 是以前称为*Hsuapsis*的早出异名, 包括多个种和未定种, 建立了*Estaingia*带(Zhang等, 1995).

(ii) 牙形刺化石带. 华北寒武系牙形刺生物地层研究至20世纪80年代初开始, 自鼓山阶晚期开始已经建立11个化石带, 与华南和全球主要地区寒武系牙形刺化石序列基本一致, 可以用于全球年代地层进行对比(安泰痒等, 1983; Chen和Gong, 1986; Bagnoli等, 2014; Dong和Zhang, 2017).

(iii) 小壳化石化石带. 华北地台南部和东部边缘

国际年代地层			年龄 (Ma)	中国 统	中国 阶	三叶虫化石带 (彭善池, 2009b; 袁金良等, 2012)	牙形刺化石带 (安泰庠, 1983; Chen和Gong, 1986; Bagnoli 等, 2014)
Cambrian	Furongian	Stage 10	485.4±1 Ma – 489.5	芙蓉统	牛车河阶	*Yosimuraspis*(部分)	*Cordylodus intermedius* (部分)
						Pseudokoldinoidia perpeltis	*Cordylodus proavus*
						Mictosaukia	*Cambrooistodus*
						Changia	*Proconodontus muelleri*
							Proconodontus posteroconstatus
		Jiangshanian	489.5 – 494		江山阶	*Tsinania-Ptychaspis*	*Proconodontus tenuiserratus*
						Kaolishania	*Westergaardodina aff. fossa*−*Prooneotodus rotundatus*
						Maladioidella	
						Changshania−*Irvingella*	
		Paibian	494 – 497		排碧阶	*Chuangia*	*Muellerodus? erectus*
	Miaolingian	Guzhuangian	497 – 500.5	苗岭统	古丈阶	*Prochuangia-Paracoosia*	*Westergaardodina matsushita*
						Neodrepanura premesnili	*Westergaardodina orygma*
						Blackwelderia paronai	*Shandongodus priscus*
		Drumian	500.5 – 504.5		鼓山阶	*Damesella paronai*	*Laiwugnathus laiwuensis*
						Liopeoshania lubrica	
						Taitzuia insueta-Poshania poshanensis	
						Amphoton deois	未建带
						Crepicephalina convexa	
						Megagraulos coreanicus	
						Inouyella peiensis-Peishannia convexa	
		Wuliuan	504.5 – 509		乌溜阶	*Bailiella lantenoisi* *Tonkinella falbelliformis-Poriagraulos natus* *Inouyops titiana* *Metagraulos nitidus* *Sunaspis laevis-Sunaspidella rara* *Sinopagetia jinnanensis* *Ruichengaspis mirabilis* *Asteromajia hsuchuangensis*	
						Shantungaspis aclis *Probowmaniella jiawangenaia*	
	Series 2	Stage 4	509 – 514	黔东统	都匀阶	*Yaojiayuella-Weijiaspis*	
						Qiaotouaspis-Paragraulos	
						Redlichia nobilis	
						Redlichia(Pteroredlichia) chinensis	
						Palaeolenus fengshanensis	
		Stage 3	514 – 521		筇竹寺阶	*Estaingia* (=*Hsuapsis*) *Stenotheca drepanoida* -*Pelagiella madianensis* (小壳化石)	
						贫化石	
	Terreneuvian	Stage 2	521 – 528	纽芬兰统	肖滩阶		
		Fortunian	528 – 539		幸运阶		

图 5　华北寒武纪地层表与时间框架

寒武系底部产华北最早三叶虫*Estaingia*的层位同时产有丰富的小壳化石(何廷贵等, 1984; 钱逸, 1999). 冯伟民等(1994)曾以微型软体动物为特征建立了*Stenotheca drepanoida-PelagiellaMadianensis*组合带. 这个化石带的分子与三叶虫*Estaingia*可以与澳大利亚南部同时期地层对比, 其地层相当于传统沧浪浦阶下部和目前筇竹寺阶上部(见Yun等, 2016及其参考文献).

另外, 在安徽省肖县三叶虫*Changshania*带内发现了华北地区最早的笔石化石*Dendrograptus*、*Callograptus*和*Dictyonema*等(李罗照, 1984). 在三叶虫*Tsinania-Ptychaspis*带发现了中国最古老的头足类*Plectronoceras*, 随后头足类在寒武系顶部发生了以爱丽斯曼角石目为特征的第一幕辐射演化, 建立了*Sinoeremoceras*带或*Acaroceras-Eburoceras*带(陈均远等, 1979). 这些化石也可以用于地层对比.

4.2.2 化学地层

华北寒武系碳同位素化学地层研究最早开始于寒武系-奥陶系界线层型研究(Chen等, 1995; 张俊明等, 1999). 到目前为止, 华北寒武系碳同位素化学地层曲线并不完整(Zhu等, 2004), 相关研究主要侧重于重要事件的研究, 如SPICE事件(Ng等, 2014a, 2014b). 现有的研究资料表明, 华北寒武系自第二统开始至寒武系顶部的碳同位素化学地层曲线与全球特征基本一致, 碳同位素ROECE、DICE和SPICE事件在华北都有明显的记录, 可以用于地层划分与对比.

4.3 塔里木寒武系

塔里木寒武系露头主要分布于塔里木盆地西北缘的乌什-柯坪地区和东北缘的库鲁克塔格地区, 在盆地北缘的哈尔克山南坡小铁列一带也有出露. 其中, 库鲁克塔格地区寒武系层序完整, 出露广泛, 是新疆寒武系研究历史最早的地区之一, 早在20世纪20年代、30年代中瑞科学考察团就在本区进行了寒武系地层古生物的研究工作(Norin, 1937; Troedsson, 1937). 库鲁克塔格北区为斜坡相区以斜坡相碳酸盐岩和浊积岩或风暴岩沉积为主; 库鲁克塔格南区为陆架盆地相区以硅质岩、黑色泥晶灰岩、碳质泥岩、白云岩等为主. 乌什-柯坪地区寒武系主要为一套开阔-半闭塞台地相沉积, 岩性是以白云岩为主的浅海台地相碳酸盐岩, 最底部的玉尔吐斯组具含磷沉积. 北缘的哈克尔山南坡的小铁列一带(属于南天山)寒武系主要为一套斜坡相碳酸岩和浊积岩沉积, 在古地理上属于台地北缘的斜坡相区(周志毅, 2001; 冯增昭等, 2006). 相对于华南和华北的寒武系, 塔里木寒武系的露头有限, 研究程度相对较低. 随着塔里木盆地古生代油气资源勘探的需求, 近些年来塔里木地区寒武系地层研究取得一些的新进展(图6).

4.3.1 生物地层

(i) 乌什-柯坪地区(浅水相区). 该地区寒武系自下而上分为玉尔吐斯组、肖尔布拉克组、吾松格尔组、沙依里克组、阿瓦塔格群、下丘里塔格群和上丘里塔格群蓬莱坝组下部.

(ii) 三叶虫化石带. 依据林焕令等(见周志毅, 2001)研究和总结, 肖尔布拉克组自下而上可分为3个三叶虫化石带: *Tsunyidiscus*带、*Ushbaspis*带和*Kepingaspis-Tianshanocephalus*带; 吾松格尔组下部建有*Paokannia*带. 这几个化石带可以与华南筇竹寺阶中上部对比, 其中最早的*Tsunyidiscus*带大约相当于华南筇竹寺阶*Wutingaspis-Eoredlichia*带的上部和*Yiliangella*带. 沙依里克组底部建立了*Kunmingaspis-Chitidilla*带, 相当于都匀阶的顶部. 阿瓦塔格群及下丘里塔格群化石贫乏, 没有建立化石带.

(iii) 小壳化石带. 该地区寒武系底部玉尔吐斯组底部为灰黑色含磷或含磷结核硅质岩夹薄层或透镜状白云岩; 中部为黑色碳质页岩、杂色页岩夹白云岩; 上部为白云岩夹页岩. 上部和下部均发现小壳化石(钱建新和肖兵, 1984; 岳昭和高林志, 1992; 钱逸, 1999), 可以建立两个组合带: 底部*Anabarites-Protohertzina*组合带, 属于幸运阶底部; 上部的*Lapworthella-Ninella-Cambroclavus*组合带与扬子地台的陕南地区筇竹寺阶下部小壳化石*Ninella tarimensis-Cambroclavus fangxiangensis* 带对比(Steiner等, 2007).

另外, 在玉尔吐斯组底部含磷结核硅质岩内发现有疑源类, 为寒武系底部典型的疑源类AHC组合(Yao等, 2005; Dong等, 2009). 在下丘里塔格群上部及上丘里塔格群蓬莱坝组下部发现了包括*Proconoduntus cambrica*等寒武系顶部牙形刺化石, 并建立了下*Monocostodus sevierensis*带(周隶康等, 1991; 张师本和高琴琴, 1992).

(iv) 库鲁克塔格地区(深水相区). 该地区寒武系自

国际年代地层				中国 统	中国 阶	库鲁克塔地区 三叶虫化石带 (周志毅, 2001; 彭善池, 2009a)	库鲁克塔地区 牙形石化石带 (钟瑞和郝永祥, 1990)	乌什–柯坪地区 三叶虫与小壳化石带 (周志毅, 2001; 钱逸, 1999)
485.4±1 Ma – 489.5	Cambrian	Furongian	Stage 10	芙蓉统	牛车河阶	*Hysterolenus*(部分); *Lotagnostus hedini*; *Lotagnostus americanus -Hedinaspis*	*Cordylodus proavus*; *Proconodontus*	*Monocostodus serierensis*（牙形刺）
489.5 – 494			Jiangshanian		江山阶	*Irvingella-Sinoproceratopyge kiangshanensis*	*Prooneotodus rotundatus -P.terashimai*	贫化石
494 – 497			Paibian		排碧阶	*Glyptagnostus reticulatus -Prochuangia*		
497 – 500.5		Miaolingian	Guzhuangian	苗岭统	古丈阶	*Glyptagnostus stolidotus*; *Buttsia-Cyclagnostus*; *Lejopyge sinensis*		
500.5 – 504.5			Drumian		鼓山阶	*Lejopyge armata*; *Pseudophalacroma ovale*; *Ptychagnostus punctuosus*; *Ptychagnostus atavus*	*Gapparodus bisulcatus-Westergaardodina*	
504.5 – 509			Wuliuan		乌溜阶			
509 – 514		Series 2	Stage 4	黔东统	都匀阶	*Arthricocephalus -Olennoides*; *Arthricocephalus -Changsapis*; *Tianshanocephalus*		*Kunmingaspis-Chittidilla*; 贫化石
514 – 521			Stage 3		筇竹寺阶	*Ushbaspis-Chengkouia*	*Aldanocyathus -Coscinocysthus*（古杯化石）	*Paokannia*; *Kepingaspis- Tianshanocephalus*; *Ushbaspis*; *Shizhudiscus*; *Lapworthella-Ninella- Cambroclavus*
521 – 528		Terreneuvian	Stage 2	纽芬兰统	肖滩阶			贫化石
528 – 539			Fortunian		幸运阶	*Asteridium -Comasphaeridium -Heliosphaeridium*（疑源类）	*Kaiyangite*（小壳化石）	*Anabarites-Protohertzina*; *Asteridium -Comasphaeridium -Heliosphaeridium* (疑源类)

图 6 塔里木寒武纪地层表

下而上分为西山布拉克组、西大山组、船形山组、莫合尔山组、突尔沙克组和金龙沟组(北区)或白云岗组(南区).

(v) 三叶虫化石带. 依据林焕令等(见周志毅, 2001)和彭善池(2009b)总结, 最早的三叶虫出现在西大山组, 向上至寒武系顶部化石非常丰富, 具有华南斜坡相的三叶虫面貌, 所建立的化石带与华南斜坡相基本一致, 可以很好的进行年代地层对比(图6).

(vi) 牙形刺化石带. 钟端和郝永祥(1990)库鲁克塔格地区寒武系建立4个牙形刺化石带(图6). 最早的牙形刺带*Gapparodus bisulcatus-Westergaardodina*带发现于莫合尔山组上部, 与华南和华北的牙形刺化石一样, 都是从鼓山阶开始. 牙形刺化石在寒武系顶部金龙沟组(北区)或白云岗组(南区)越来越丰富, *Proconodontus*和*Cordylodus*不同种形成演化序列, 尽管目前只建立了*Proconodontus*带和*Cordylodus proavus*带, 但对年代地层对比帮助很大. 库鲁克塔格地区寒武系之上部由外陆棚深水相灰岩组成, 进一步的牙形刺生物地层详细研究可望该地区的寒武系高分辨率年代地层划分和对比提供依据.

另外, 在西大山组与最早三叶虫*Ushbaspis*等共生的有丰富的小壳化石(如*Pelagiella*)、腕足类(*Lingulella*)和海绵骨针等化石(高振家等, 1984; 钟端和郝永祥, 1990), 在北区西大山组还发现较丰富的古杯化石(章森桂, 1983); 在西山布拉克组硅质岩中发现寒武系底部典型的疑源类AHC组合, 以及小壳化石*Kaiyangites* (Yao等, 2005; Dong等, 2009). 这些化石均可以用于年代地层对比(图6).

4.3.2　化学地层

塔里木地区化学地层研究在20世纪90年代中期就已经开始(杜小弟等, 1994; 王宗哲和杨杰东, 1994), 主要是对乌什-柯坪地区露头剖面的研究. 近些年来, 该地区寒武系新的高分辨率碳同位素化学地层研究均与早期研究结果相一致(景秀春等, 2008; Wang等, 2011; Guo等, 2017), 证实了该地区寒武系很好地记录了BACE、AECE和ROECE事件. 特别是沙依里克组底部的ROECE负异常事件表现非常稳定, 为该地区寒武系年代地层对比提供了重要依据. 但是到目前为止, 所有乌什-柯坪地区的碳同位素化学地层研究均没有发现SPICE事件. 该事件在全球寒武系上部不同相区的地层中均有记录, SPICE事件的缺失是否表明该地区相当于芙蓉统底部存在沉积间断, 需要今后进一步确认.

包括库鲁克塔格地区在内的塔里木盆地东部, 寒武系化学地层研究长期以来处于空白. 最新的露头剖面和钻井剖面寒武系碳同位素数据表明SPICE事件在塔里木盆地东部是有记录的. 但从目前发表的数据来看, SPICE事件之下的地层中碳同位素数据普遍偏低, 在相当于第二统和第三统界线附近的ROECE事件也没有记录(Liu等, 2016), 需要今后进一步研究加以论证.

5　中国寒武系底界的识别

5.1　华南寒武系底界

鉴于目前国际寒武系底界建议以碳同位素BACE负异常底界作为识别标志, 就目前的资料来看, 滇东地区和川西部分地区 BACE负异常底界位于灯影组顶部的白云岩层内(如Brasier等, 1990; Zhang等, 1997; Li等, 2009, 2013). 因而, 这些地区的寒武系底界位于灯影组顶部, 在野外不易识别具体界线点, 需要开展碳同位素地层学研究加以厘定.

但是在扬子地台大多数地区, 寒武系底部一般发育含硅质、磷质岩层, 厚度不等(厘米至百米), 在绝大的部分地区硅磷质层段与其下伏的埃迪卡拉系灯影组碳酸盐岩和上覆的黑色页岩地层之间是平行不整合接触关系, 上下均有地层缺失. 在这样的剖面上, BACE负异常底界位于灯影组白云岩顶部不整合面, 如湖北三峡岩家河剖面, 该剖面曾经被认为是华南寒武系底部地层记录最完整的代表性剖面之一(Ishikawa等, 2008, 2013; Jiang等, 2012; 王丹等, 2012). 因而, 这些剖面寒武系底界以含硅质、磷质岩石地层的出现为标志. 寒武系底部含硅质、磷质地层一般含有寒武纪小壳化石或者小型具刺的疑源类化石(AHC组合)(Ahn和Zhu, 2017), 通常从灯影组划分出来作为独立的组级岩石地层单位, 如滇东的朱家箐组、贵州的戈仲伍组、湖北三峡的岩家河组、四川的麦地坪组、陕南的宽川铺组等(钱逸, 1999). 但是, 部分地区灯影组顶部硅质、磷质地层薄(几公分至几米), 仅仅以岩石“段”的名称命名或根本就没有从灯影组划分出来, 在实践中这部分硅质、磷质层应该作为寒武系地层.

深水相区寒武系与其下伏的埃迪卡拉系是连续沉积, 一般发育一套硅质岩与黑色页岩构成的沉积序列. 由于缺少生物标志化石和碳酸盐岩, 浅水相的生物地层和碳同位素化学地层均无法应用, 因而寒武系底界难以识别. 传统的地层对比认为寒武系底界至于硅质岩和黑色页岩的岩石地层界面上. 但多年研究发现, 在过渡相区至斜坡和深水盆地相区硅质岩地层厚度和下伏地层有明显差异, 因而是一个明显穿时的岩石地层体. 在过渡相区硅质岩层(留茶坡组)下部有类似灯影组的块状白云岩段存在, 在斜坡和深水盆地相区硅质岩之下为黑色页岩. 一些剖面上, 留茶坡组或皮园村组上部有典型的埃迪卡拉纪晚期化石分子, 如*Palaeopascichnus*(Dong等, 2008; 董琳等, 2012; Wang等, 2012b); 但在另一些剖面上, 硅质岩石层发现有海绵骨针, 甚至出现小壳化石*Kaiyangites*(尹恭正等, 1982), 表明寒武系底界位于硅质岩层上部. 如前文所述, 同位素年代学为这种划分提供了支持. 为进一步探讨解决深水相区寒武系底界和下部地层划分问题, 近些年来采用有机碳同位素的尝试看来具有参考价值, 类似BACE负异常在所有剖面均有记录(如Guo等, 2013).

5.2 华北寒武系最低层位穿时性

华北寒武系底部存在一个巨大不整合面, 缺失纽芬兰统和黔东统下部地层, 因而华北地台寒武系不在底界问题, 而是最低层位的地层对比问题. 主要包括两个方面, 一是寒武系最低层位的穿时性和年代差异; 二是在华北地台东南缘的胶辽徐淮地区寒武系底部与之下地层存在两个或多个不整合面, 寒武系的最低层位存在疑问.

在华北地台南缘和西南缘, 猴家山组和辛集组一般作为寒武系底部地层, 底部基本上都发育含磷段. 辛集组和猴家山组下部碳酸岩中含丰富的三叶虫*Estaingia*等, 中部为灰岩含三叶虫*Palaeolenus fengyangensis*等, 根据三叶虫的地层对比相当传统沧浪铺阶中下部(Zhang等, 1995). 在含三叶虫*Estaingia*的层位, 共生有丰富的小壳化石, 其组合面貌的对比也支持了三叶虫地层对比的结论(钱逸, 1999; Yun等, 2016), 即寒武系在华北地台南缘和西南缘最低层位不低于华南筇竹寺阶*Yiliangella*带. 从地台边缘内部向地台内部, 寒武系底部层位成为越来越高. 在山东和河北、辽宁西部寒武系底部没有含磷地层, 底部不整合面之上直接由一套灰岩组成(昌平组), 含三叶虫*Palaeolenus fengyangensis*和*Redlichia*, 时代也应大致相当传统沧浪铺阶上部, 即都匀阶(张文堂和朱兆玲, 1979).

值得注意的是, 在华北南缘的霍邱马店、淮南八公山地区猴家山组之下与凤台组杂砾岩之间发育一套厚度不等的黑色页岩, 称之为雨台山组; 在河南驻马店一直向西至灵宝、陕南洛南一线辛集组与罗圈组杂砾岩之间也有一套黑色页岩地层, 称之为东坡组. 雨台山组和东坡组沉积的年代不确定. 我们最近的研究确认了霍邱马店地区雨台山组黑色页岩上部含有典型的无铰腕足类化石, 属于寒武系无疑. 而雨台山组下部含有磷质结核, 与凤台组杂砾岩为连续沉积, 由于凤台组杂砾岩时代不确定, 一般认为是前寒武系. 同样, 东坡组与罗圈组冰碛岩为连续沉积, 如果罗圈组冰碛岩是前寒武系, 那么东坡组也属于前寒武系的可能性更大, 因为东坡组与上覆辛集组为不整合接触. 目前看来, 凤台组和罗圈组杂砾岩的时代是解决雨台山组下部和东坡组黑色页岩地层时代的关键, 需要今后加强研究.

在安徽北部淮北地区寒武系底部含三叶虫的猴家山组之下和前寒武系望山组之间的金山寨组和沟后组以前一直作为寒武系地层, 但是缺乏可靠的化石证据(邢裕盛等, 1984, 1985; 钱迈平等, 2001). 最近, 沟后组的疑源类化石组合(如*Trachyhystrichosphaera*、*Valeria*和*Dictyosphaera*等)表明其也属于新元古代早期地层(Xiao等, 2014; Tang等, 2015). 然而, 沟后组碎屑锆石年龄((518.4±2.9)Ma)则支持寒武系的对比(He等, 2017), 也就是沟后组应该年轻于518Ma, 或者说晚于华南含澄江生物群的玉案山组. 如果沟后组属于寒武系, 鉴于其与下伏的金山寨组之间不具有明显的不整合接触关系, 以及金山寨组底部底砾岩的存在, 那么寒武系底界可能位于金山寨组底部. 这种地层对比的矛盾需要今后进一步工作加以解决.

与安徽北部相似, 辽东半岛的大连地区寒武系底部含三叶虫的碱厂组之下与前寒武系新民村组之间的葛屯组和大林子组时代问题也没有解决. 其中大林子组与淮北地区沟后组沉积序列相似, 为一套干旱、蒸发环境下的杂色碎屑岩沉积为主, 石盐假晶、干裂纹构造发育, 因而两者有可能为同时间沉积. 葛屯组与上覆的大林子组沉积间断不明显, 而与下伏新民村组之间为不整合接触, 为一套富含有机质的细碎屑岩夹碳酸盐岩沉积, 有可能与淮南和霍邱地区的雨台山组

黑色页岩属于同时期沉积. 由此可见, 葛屯组和大林子组属于寒武系的可能性比较大.

吉林通化地区碱厂组之下还发育黑沟子组和青沟子组. 黑沟子组下部为含磷碎屑岩, 含软舌螺等小壳化石，其时代应与猴家山组和辛集组底部相当(岳昭等, 1990; 钱逸, 1999). 黑沟子组之下青沟子组以一套灰岩成积为特征，由于没有可靠化石依据以前作为前寒武系地层, 段吉业等(2005)将其作为寒武系, 这一问题也值得今后进一步澄清.

5.3 塔里木寒武系底界识别

以乌什-柯坪地区寒武系代表的塔里木盆地广大浅水相区，寒武系底部玉尔吐斯组与下伏埃迪卡拉系奇格布拉克组之间存在一个不整合面. 如前文所述, 该不整合之上不厚的含磷硅质层段发现有寒武系底部幸运阶的小壳化石和疑源类化石. 含磷硅质层段和之上的黑色页岩属于凝缩层段，因为玉尔吐斯组上段地层中已经含有筇竹寺阶下部的典型化石.

塔里木地区寒武系底界的问题主要是在库鲁克塔格地区. 该地区西山布拉克组与下伏的汉格尔乔克组杂砾岩之间发育有碳酸盐岩段和硅质岩段，中间夹有火山喷发岩. 据我们野外观察，汉格尔乔克组杂砾岩与之上的碳酸盐岩段是连续沉积，与之上的西山布拉克组也没有发现沉积间断面，这与该区属于较深水沉积环境是吻合的. 由于下伏的汉格尔乔克组杂砾岩的时代目前无法确定，寒武系底界具体位于什么层位目前还是未解难题. 西山布拉克组硅质岩中产有幸运阶疑源类化石，并发现了华南寒武系底部斜坡相区的小壳化石*Kaiyangites*(Yao等, 2005)，因此寒武系底部应该位于西山布拉克组含寒武系化石的硅质岩之下地层内. 就目前来看, 可以暂时置于西山布拉克组硅质岩层的底部.

6 中国寒武系上部白云岩地层的划分与对比问题

中国寒武系在华南、华北和塔里木三个地层分区的浅水台地相区均发育了一套巨厚的白云岩地层，基本不含化石或化石稀少，地层穿时明显，大约相当于寒武系第三统至奥陶系下部地层. 这套地层包括扬子地台区的娄山关群、二道水群、洗象池群和三游洞组，华北地台内安徽淮南及其邻近河南地区的三山子组，以及塔里木地台阿克苏-乌什地区的阿瓦塔格群、下丘里塔格群和上丘里塔格群等，其划分与对比问题长期存在. 由于华南和华北寒武系上部至奥陶系下部牙形刺生物地层系列已经建立起来(图4和5)，目前在三大区块的这套白云岩地层中也均有零星的牙形刺化石报道. 特别是芙蓉统底部特征的全球性碳同位素SPICE异常事件在华北和华南都有记录，为解决这套寒武系上部巨厚白云岩的年代地层划分和寒武系顶界问题提供了可能. 因而, 通过牙形刺生物地层结合碳同位素化学地层可能是解决这套白云岩地层对比的有效途径. 例如, 贵州北部娄山关群上部SPICE事件的识别和牙形刺生物地层序列的建立就是一个好的研究实例(左景勋等, 2008; Fan等, 2013). 但是塔里木地区从沙依里克组上部到阿瓦塔格群和丘里塔格群这套白云岩地层中没有发现SPICE的记录, 不排除有沉积缺失, 因而需要加强这套地层的沉积岩石学和岩石地层学研究.

7 总结

中国寒武系地层研究经过几代人的不懈努力，不仅为全球寒武系年代地层系统的建立做出了重要贡献，也在中国寒武系基础地质研究和地矿资源勘探中发挥了重要作用. 通过总结可以看出，全球寒武系上部年代地层建阶工作即将完成，上部两统的底界和6阶中的4个阶(乌溜阶、古丈阶、排碧阶和江山阶) GSSP均建立在华南，另外第十阶的GSSP也有望在华南建立. 但是全球寒武系下部年代地层的建阶工作遇到很大困难，单一地层学手段看来无法解决问题，应用多种地层学方法在全球不同地区同时开展综合地层研究才是有效途径. 就目前国际寒武系下部两统4阶方案的研究现状和中国寒武系发育特点，滇东北地区埃迪卡拉系-寒武系过渡地层具有连续的生物化石和化学地层记录, 并有可靠的同位素年代学数据, 有望对寒武系底界的全球对比和第二阶GSSP的建立做出贡献; 在扬子地台与江南斜坡之间过渡相区(黔东南、湘西南、皖南等地区)寒武系地层连续，第二统上部广布性的掘头类三叶虫化石记录完整, 具备建立第四阶GSSP的潜力. 因而, 今后应该加强这几条年代地层界线的研究. 目前的年代学数据表明, 寒武系下部两统跨越的时

限(~30Ma)要明显比上部两统时限(~23.6Ma)更长, 因而在有条件的情况不排除划分为更多的阶, 以提高年代地层和时间的精度.

近10余年来, 中国寒武系研究进展很大, 地层划分和对比精度不断提高(图4~6). 但是也存在不少问题. 除了与全球年代地层存在的相同问题外, 中国寒武系研究面临还面临如下主要问题:

(1) 台地浅水相区和斜坡深水相区的寒武系对比问题. 主要问题包括三个方面: 一是浅水相区和斜坡深水相区三叶虫生物地层的精确对比问题, 需要今后加强两个相区共有三叶虫分子的系统学和地层分布研究; 二是深水相区寒武系下部主要为富含有机质的黑色碎屑岩和磷硅质岩, 缺少生物化石和碳酸盐岩, 无法开展生物和无机碳同位素化学地层研究. 因而这套黑色岩系的划分和年代问题将长期存在, 需要今后加强综合地层学研究. 这个问题主要存在于华南地区; 三是浅水相区寒武系上部贫化石白云岩地层的划分和对比问题, 这个问题在华南、华北和塔里木地区均存在. 牙形刺生物地层结合碳同位素化学地层研究可能是解决这套白云岩地层对比的有效途径.

(2) 寒武系底界问题. 鉴于国际寒武系底界GSSP的缺陷, 依据遗迹化石*T. pedum*首现标准识别寒武系底界是个全球难题. 本文提出以碳同位素BACE事件的底部作为厘定依据, 在台地相区这条界线明显穿越不同岩性段, 部分地区与不整个面重叠. 但是在华南和塔里木地区的深水相区, 埃迪卡拉纪-寒武纪过渡地层缺少碳酸盐岩, BACE事件无法识别. 尽管华北底部具有一个巨大不整合面, 不存在寒武系底界问题, 但是在华北地台边缘地区, 寒武系最老地层的识别也一直没有解决. 如何解决这些难题需要今后开展很多的综合地层学研究.

(3) 中国寒武系分布广泛, 近些年来在青藏地区、柴达木、天山北部、秦岭构造带、滇西南等地区发现新的寒武纪地层, 获得大量新材料. 由于作者没有过多介入研究, 加之论文篇幅有限, 本文没有对这些地层进行介绍. 总的来看, 这些地区寒武纪地层研究程度低, 研究工作急需加强.

致谢 本文是在作者多年研究寒武系地层以及综合国内外研究的基础上完成. 限于水平, 论文难免有疏漏和错误, 敬请读者指正. 论文成文过程中得到戎嘉余和沈树忠等的鼓励与支持; 彭善池、赵元龙和一匿名评审人对稿件修改提出宝贵建议, 在此一并致谢. 有关研究得到全国各地不同部门和单位的支持, 得益于国内外同行的合作.

参考文献

安泰痒, 张放, 向维达, 张又秋, 徐文豪, 张慧娟, 姜德标, 杨长生, 蔺连第, 崔占堂, 杨新昌. 1983. 华北及邻区牙形石. 北京: 科学出版社. 223

陈均远, 邹熙平, 陈挺恩, 齐敦伦. 1979. 中国北方晚寒武世爱丽斯曼角石目头足类. 古生物学报, 18: 103–122

陈均远, 周桂琴, 朱茂炎, 叶贵玉. 1996. 澄江生物群: 寒武纪生命大爆炸的见证. 台中: “国立”自然博物馆出版. 222

董琳, 宋伟明, 肖书海, 袁训来, 陈哲, 周传明. 2012. 皖南地区埃迪卡拉系皮园村组微体和宏体化石——兼论埃迪卡拉纪-寒武纪界线. 地层学杂志, 36: 600–610

杜小弟, 刘万洙, 王东坡. 1994. 碳氧同位素与海平面变化——以新疆柯坪地区上震旦统-奥陶系碳氧同位素剖面为例. 世界地质, 13: 120–123

段吉业, 安素兰, 刘鹏举, 彭向东, 张立勤. 2005. 华北板块东部寒武纪地层、动物群及古生物. 香港: 雅园出版公司. 255

冯伟民, 钱逸, 戎治权. 1994. 河南叶县下寒武统辛集组单板类和腹足类化石的研究. 微体古生物学报, 11: 1–19

冯增昭, 鲍志东, 吴茂炳, 金振奎, 时晓章. 2006. 塔里木地区寒武纪岩相古地理. 古地理学报, 8: 427–439

高振家, 彭昌文, 李永安, 朱诚顺, 章森桂. 1984. 新疆库鲁克塔格震旦纪、寒武纪地层划分和对比. 见: 高振家, 朱诚顺, 编. 新疆前寒武纪地质. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社. 1–105

何廷贵, 裴放, 符光宏. 1984. 河南方城下寒武统辛集组一些小壳动物化石. 古生物学报, 23: 350–357

江能人, 王尊周, 陈永光, 1964. 滇东区寒武纪地层的探讨. 地质学报, 44: 137–155

景秀春, 邓胜徽, 赵宗举, 卢远征, 张师本. 2008. 塔里木盆地柯坪地区寒武-奥陶系界线附近的碳同位素组成与对比. 中国科学D辑: 地球科学, 38: 1284–1296

李罗照. 1984. 山东大泣口上寒武统长山组笔石的发现. 地质论评, 30: 511–515

林天瑞. 2015. 也论中国的*Parabadiella*, 摩洛哥的*Abadiella*及澳大利亚的*Abadiella huoi*——并从聚类分析角度来探讨有关的abadiellid类三叶虫的分类. 古生物学报, 54: 458–468

林天瑞, 彭善池. 2009. 再论三叶虫*Megapalaeolenus* Chang, 1966属的无效地位. 古生物学报, 48: 695–700

卢衍豪. 1962. 中国的寒武系. 全国地层会议学术报告汇编. 北京: 科学出版社. 117

卢衍豪, 张文堂, 朱兆玲, 项礼文, 林焕令, 周志毅, 袁金良, 彭善池,

钱逸, 章森桂, 李善姬, 郭鸿俊, 罗惠麟. 1994. 关于中国寒武系建阶建议. 地层学杂志, 18: 318
卢衍豪, 朱兆玲, 钱义元, 林焕令, 周志毅, 袁克兴. 1974. 生物-环境控制论及其在寒武纪生物地层学上和古动物地理上的应用. 中国科学院南京地质古生物研究所集刊, 5: 27–116
卢衍豪, 朱兆玲, 钱义元, 林焕令, 袁金良. 1982. 中国寒武纪地层对比表及说明书. 见: 中国各纪地层对比表及说明书. 北京: 科学出版社. 28–54
罗惠麟, 胡世学, 侯蜀光, 高宏光, 詹冬琴, 李文昌. 2009. 滇东南寒武纪地层及三叶虫动物群. 昆明: 云南科技出版社. 1–252
罗惠麟, 蒋志文, 唐良栋. 1994. 中国下寒武统建阶层型剖面. 昆明: 云南科技出版社. 181
罗惠麟, 蒋志文, 武希彻, 宋学良, 欧阳麟. 1982. 云南东部震旦系-寒武系界限. 昆明: 云南人民出版社. 263
罗惠麟, 蒋志文, 武希彻, 宋学良, 欧阳麟, 邢裕盛, 刘桂芝, 张世山, 陶永和. 1984. 中国云南晋宁梅树村震旦系-寒武系界限层型剖面. 昆明: 云南人民出版社. 154
彭善池. 2000. 斜坡相寒武系. 见: 中国科学院南京地质古生物研究所编著. 中国地层研究二十年(1979–1999). 第二章. 北京: 中国科技技术出版社. 23–38
彭善池. 2008. 华南寒武系年代地层系统的修订及相关问题. 地层学杂志, 32: 239–245
彭善池. 2009a. 华南新的寒武纪生物地层序列和年代地层系统. 科学通报, 54: 2691–2698
彭善池. 2009b. 华南斜坡相寒武纪三叶虫动物群研究回顾并论我国南、北方寒武系的对比. 古生物学报, 48: 437–452
彭善池, 袁金良, 赵元龙. 2000a. 台江阶——我国寒武系一个新的年代地层单位. 地层学杂志, 24: 53–54
彭善池, 周志毅, 林天瑞, 袁金良. 2000b. 寒武纪年代地层研究现状和研究方向. 地层学杂志, 24: 8–17
钱逸. 1977. 华中西南区早寒武世梅树村阶的软舌螺纲及其他化石. 古生物学报, 16: 255–278
钱逸. 1999. 中国小壳化石分类学与生物地层学. 北京: 科学出版社. 247
钱逸, 朱茂炎, 何延贵, 蒋志文. 1996. 再论滇东地区前寒武系与寒武系界线剖面. 微体古生物学报, 13: 225–240
钱建新, 肖兵. 1984. 新疆阿克苏-乌什地区早寒武世小壳动物群. 地层古生物论文集, 13: 65–90
钱迈平, 袁训来, 厉建华, 阎永奎, 汪迎平. 2001. 淮北地区寒武系/新元古界界线讨论. 地层学杂志, 25: 135–143
全国地层委员会. 2002. 中国区域年代地层(地质年代)表说明书. 北京: 地质出版社. 72
孙云铸. 1961. 中国寒武纪地层划分问题. 地质学报, 41: 285–289
王成源, 彭善池. 2017. 推进《国际年代地层表》在中国的应用. 地层学杂志, 41: 216–220
王丹, 凌洪飞, 李达, 陈曦. 2012. 三峡地区岩家河埃迪卡拉系-寒武系界线剖面碳同位素地层学研究. 地层学杂志, 36: 21–30
王钰. 1938. 湖北峡东(宜昌石灰岩)的时代问题. 地质论评, 3: 131–142
王钰. 1945. 三峡式下部古生代之分层. 地质论评, 10: 9–14
王泽九, 黄枝高, 姚建新, 马秀兰. 2014. 中国地层表及说明书的特点与主要进展. 地球学报, 35: 271–276
王宗哲, 杨杰东. 1994. 新孤柯坪地区早古生代地层的碳同位素变化特征及其意义. 地层学杂志, 18: 45–52
项礼文, 赖才根, 林宝玉, 侯鸿飞, 詹立培. 1980. 中国古生代分统划阶. 见: 国际交流地质学术论文集——为二十六届国际地质大会撰写, 4 地层古生物. 北京: 地质出版社. 56–60
项礼文, 李善姬, 南润善, 郭振明, 杨家騄, 周志强, 安泰痒, 袁克兴, 钱逸. 1981. 中国的寒武系. 中国地层(4). 北京: 地质出版社. 210
项礼文, 朱兆玲, 李善姬, 周志强. 1999. 中国地层典. 寒武系. 北京: 地质出版社. 95
邢裕盛, 丁启秀, 罗惠麟, 何廷贵, 王砚耕. 1984. 中国震旦系-寒武系界限. 中国地质科学院地质研究所所刊, 第10号. 北京: 地质出版社. 262
邢裕盛, 丁启秀, 林蔚兴, 阎永奎, 张录易. 1985. 后生动物及遗迹化石. 见: 邢裕盛, 段承华, 编. 中国晚前寒武纪古生物. 北京: 地质出版社. 182–192
杨爱华, 朱茂炎, 张俊明. 2005. 扬子地台早寒武世古盘虫类的时空分布及其古地理环境控制. 古地理学报, 7: 219–232
杨兴莲, 赵元龙, 朱茂炎, 崔滔, 杨凯迪. 2010. 贵州丹寨寒武系牛蹄塘组海绵动物化石及其环境背景. 古生物学报, 49: 348–359
尹恭正, 王砚耕, 钱逸. 1982. 贵州震旦系与寒武系分界的初步研究. 地层学杂志, 6: 286–293
袁金良, 李越. 1999. 安徽淮南老鹰山下、中寒武统界线及三叶虫动物群. 古生物学报, 38: 407–422
袁金良, 李越. 2014. 山东枣庄峄城区石榴园寒武系馒头组顶部(徐庄阶)的三叶虫. 古生物学报, 53: 497–526
袁金良, 李越, 穆西南, 林日白, 朱学剑. 2012. 山东及邻区张夏组(寒武系第三统)三叶虫动物群. 中国古生物志, 总号第197册, 新乙种第35号. 上册. 北京: 科学出版社. 467
袁金良, 赵元龙. 1999. 西南地区下寒武统划分与对比——兼论早寒武世系列生物群的时代. 古生物学报, 39(增刊): 116–130
袁金良, 赵元龙, 王宗哲, 周震, 陈笑媛. 1997. 贵州台江八朗下、中寒武统界线及三叶虫动物群. 古生物学报, 36: 494–524
袁金良, 赵元龙, 李越, 黄友庄. 2002. 黔东南早、中寒武世凯里组三叶虫动物群. 上海: 上海科学技术出版社. 1–422
岳昭, 高林志, 乔秀夫, 刘桂芝. 1990. 吉林通化地区寒武系底界时代及下寒武统沉积环境探讨. 地质论评, 36: 229–237
岳昭, 高林志. 1992. 新疆阿克苏-乌什地区下寒武统原牙形类等化石及其地质意义. 中国地质科学院地质研究所所刊, 23: 133–160
张俊明, 王海峰, 李国祥. 1999. 吉林大阳岔上寒武统凤山组——下奥陶统治里组层序地层和化学地层研究. 地层学杂志, 23: 81–

106
张师本, 高琴琴. 1992. 塔里木盆地震旦纪至二叠纪地层古生物(Ⅱ), 柯坪-巴楚地区分册. 北京: 石油工业出版社. 329
张文堂. 2006. 寒武纪三叶虫生物地理区的一些问题. 地学前缘, 13: 139–144
张文堂, 袁克兴, 周志毅, 钱逸, 王宗哲. 1979. 西南地区的寒武系. 见: 中国科学院南京地质古生物研究所, 著. 西南地区碳酸盐生物地层. 北京: 科学出版社. 39–107
张文堂, 朱兆玲, 1979. 华北南部及西南部早寒武世猴家山组的三叶虫. 古生物学报, 18: 513–525
张文堂, 朱兆玲. 2000. 寒武系. 见: 中国科学院南京地质古生物研究所, 编. 中国地层研究二十年(1979–1999). 第一章. 合肥: 中国科技技术出版社. 3–22
张文堂, 朱兆玲, 林焕令. 1980a. 中国寒武系的分阶, 分带及对比. 见: 国际交流地质学术论文集——为二十六届国际地质大会撰写. 4 地层古生物. 北京: 地质出版社. 1–6
张文堂, 卢衍豪, 朱兆玲, 钱义元, 林焕令, 周志毅, 章森桂, 袁金良. 1980b. 西南地区寒武纪三叶虫动物群. 中国古生物志, 新乙种, 第16号. 北京: 科学出版社. 1–497
张增奇, 张淑芳, 宋志勇, 迟守祥. 1994. 山东省寒武纪-早奥陶世岩石地层清理意见. 山东地质, 10(增刊): 28–38
章森桂. 1983. 新疆库鲁克塔格早寒武世古杯类. 古生物学报, 22: 9–20
章森桂, 张允白, 严惠君. 2014. 《中国地层表》(2014)正式使用. 地层学杂志, 39: 359–366
钟端, 郝永祥. 1990. 塔里木盆地震旦纪至二叠纪地层古生物(Ⅰ), 库鲁克塔格分册. 南京: 南京大学出版社. 252
周隶康, 周天荣, 王朴. 1991. 塔里木盆地东北地区丘里塔格群的时代归属. 见: 贾润胥, 编. 中国塔里木盆地北部油气地质研究. 第一期, 地层沉积. 北京: 中国地质大学出版社. 126–137
周明忠, 罗泰义, 刘世荣, 钱志宽, 邢乐才. 2013. 贵州江口平引老堡组顶部的锆石SHRIMP 年龄与对比意义. 中国科学: 地球科学, 43: 1195–1206
周志毅. 2001. 塔里木盆地各纪地层. 北京: 科学出版社. 359
周志毅, 袁金良. 1980. 西南地区下寒武统三叶虫序列. 古生物学报, 19: 331–339
周志毅, 袁金良, 张正华, 吴孝儒, 尹恭正. 1980. 贵州寒武纪地层的分类和对比. 地层学杂志, 4: 273–281
朱日祥, 李献华, 侯先光, 潘永信, 王非, 邓成龙, 贺怀宇. 2009. 梅树村剖面离子探针锆石U-Pb年代学: 对前寒武纪-寒武纪界线的年代制约. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 1105–1111
朱兆玲, 项礼文, 章森桂, 刘书才, 雒昆利, 杜圣贤, 梁宗伟. 2007. 寒武系崮山阶三叶虫生物地层新认识. 地层学杂志, 31: 165–168
左景勋, 彭善池, 朱学剑. 2008. 扬子地台寒武系碳酸盐岩的碳同位素组成及地质意义. 地球化学, 37: 118–128
Ahn S Y, Zhu M Y. 2017. Lowermost Cambrian acritarchs from the Yanjiahe Formation, South China: Implication for defining the base of the Cambrian in the Yangtze Platform. Geol Mag, 154: 1217–1231
Álvaro J J, Ahlberg P, Babcock L E, Bordonaro, O L, Choi D K, Cooper, R A. Ergaliev G K, Gapp I W, Pour M G, Hughes N C, Jago J B, Korovnikov I, Laurie J R, Lieberman B S, Paterson J R, Pegel T V, Popov L E, Rushton A W A, Sukhov S S, Tortello M F, Zhou Z Y, Zylinska A, 2014. Global Cambrian trilobite palaeobiogeography assessed using parsimony analysis of endemicity. In: Harper D A T, Servais T, eds. Early Palaeozoic Palaeobiogeography and Palaeogeography. Geol Soc Lond Memoirs, 38: 273–296
Amthor J E, Grotzinger J P, Schröder S, Bowring S A, Ramezani J, Martin M W, Matter A. 2003. Extinction of *Cloudina* and *Namacalathus* at the Precambrian-Cambrian boundary in Oman. Geology, 31: 431–434
Aubry M P, Ouda K, Dupuis C, Berggren W A, van Couvering J A, the Members of the Working Group on the Paleocene/Eocene Boundary. 2007. The global standard stratotype-section and point (GSSP) for the base of the Eocene Series in the Dababiya section (Egypt). Episodes, 30: 271–286
Babcock L E, Peng S, Geyef G, Shergold J H. 2005. Changing perspectives on Cambrian chronostratigraphy and progress toward subdivision of the Cambrian System. Geosci J, 9: 101–106
Babcock L E, Peng S, Zhu M, Xiao S, Ahlberg P. 2014. Proposed reassessment of the Cambrian GSSP. J Afr Earth Sci, 98: 3–10
Babcock L E, Robison R A, Peng S C. 2011. Cambrian stage and series nomenclature of Laurentia and the developing global chronostratigraphic scale. Museum Northern Arizona Bull, 67: 12–26
Babcock L E, Robison R A, Rees M N, Peng S C, Saltzman M R. 2007. The global boundary stratotype section and point (GSSP) of the Drumian Stage (Cambrian) in the Drum Mountains, Utah, USA. Episodes, 30: 85–95
Bagnoli G, Peng S C, Qi Y P, Wang C Y. 2017. Conodonts from the Wa'ergang section, China, a potential GSSP for the uppermost stage of the Cambrian. Riv It Paleontol Strat, 123: 1–10
Bagnoli G, Qi Y P, Zuo J X, Du S X, Liu S C, Zhang Z Q. 2014. Integrated biostratigraphy and carbon isotopes from the Cambrian Tangwangzhai section, North China. Palaeoworld, 23: 112–124
Benton M J. 1995. Diversification and extinction in the history of life. Science, 268: 52–58
Bergeron J N. 1899. Étude de quelques trilobites de Chine. Bulletin de la Société Géologique du France, Series 3, 27: 499–516
Betts M J, Paterson J R, Jago J B, Jacquet S M, Skovsted C B, Topper T P, Brock G A. 2016. A new lower Cambrian shelly fossil biostratigraphy for South Australia. Gondwana Res, 36: 176–208
Blackwelder E. 1907. Stratigraphy of Shantung. In: Willis B, Black-

welder E, Sargent R H, eds. Descriptive Topography and Geology. Research in China, Vol. 1. Pt. 1. Carnegie Inst Washington Publ, 54: 19–58

Bowring S A, Grotzinger J P, Condon D J, Ramezani J, Newall M J, Allen P A. 2007. Geochronologic constraints on the chronostratigraphic framework of the Neoproterozoic Huqf Supergroup, Sultanate of Oman. Am J Sci, 307: 1097–1145

Brasier M D, Cowie J, Taylor M. 1994a. Decision on the Precambrian-Cambrian boundary. Episodes, 17: 3–8

Brasier M D, Corfield R M, Derry L A, Rozanov A Y, Zhuravlev A Y. 1994b. Multiple δ^{13}C excursions spanning the Cambrian explosion to the Botomian crisis in Siberia. Geology, 22: 455–458

Brasier M D, Magaritz M, Corfield R, Luo H, Wu X, Ouyang L, Jiang Z, Hamdi B, He T, Fraser A G. 1990. The carbon- and oxygen-isotope record of the Precambrian-Cambrian boundary interval in China and Iran and their correlation. Geol Mag, 127: 319–332

Buatois L A. 2017. *Treptichnus pedum* and the Ediacaran-Cambrian boundary: Significance and caveats. GeolMag, 155: 174–180

Buggisch W, Keller M, Lehnert O. 2003. Carbon isotope record of Late Cambrian to Early Ordovician carbonates of the Argentine Precordillera. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 195: 357–373

Bushuev E, Goryaeva I, Pereladov V. 2014. New discoveries of the oldest trilobites *Profallotaspis* and *Nevadella* in the northeastern Siberian Platform, Russia. Bull Geosci, 89: 347–364

Chang W T. 1980. A review of the Cambrian of China. J Geol Soc Aust, 27: 137–150

Chen D, Wang J, Qing H, Yan D, Li R. 2009. Hydrothermal venting activities in the Early Cambrian, South China: Petrological, geochronological and stable isotopic constraints. Chem Geol, 258: 168–181

Chen D, Zhou X, Fu Y, Wang J, Yan D. 2014. New U-Pb zircon ages of the Ediacaran-Cambrian boundary strata in South China. Terra Nova, 27: 62–68

Chen J Y, Gong W L. 1986. Conodonts. In: Chen J Y, ed. Aspects of Cambrian-Ordovician Boundary in Dayangcha, China. Beijing: China Prospect Publishing House. 93–204

Chen J Y, Zhang J M, Nicoll R S, Nowlan G S. 1995. Carbon and oxygen isotope in carbonate rocks within Cambrian-Ordovician boundary interval at Dayangcha, China. Acta Palaeont Sin, 34: 393–409

Chen Z, Chen X, Zhou C M, Yuan X L, Xiao S H. 2018. Late Ediacaran trackways produced by bilaterian animals with paired appendages. Sci Adv, 4: eaao6691

Chen Z, Zhou C M, Meyer M, Xiang K, Schiffbauer J D, Yuan X L, Xiao S H. 2013. Trace fossil evidence for Ediacaran bilaterian animals with complex behaviors. Precambrian Res, 224: 690–701

Compston W, Zhang Z, Cooper J A, Ma G, Jenkins R J F. 2008. Further SHRIMP geochronology on the early Cambrian of South China. Am J Sci, 308: 399–420

Cowie J W. 1964. The Cambrian period. In: Harland W B, Gilbert S A, Wilcock N, eds. The Phanerozoic Time-scale: A Symposium. Q J Geol Soc Lond, 120(Spec Publ 1): 255–258

Cowie J W, Glaessner M F. 1975. The Precambrian-Cambrian boundary: A symposium. Earth-Sci Rev, 11: 209–251

Cowie J M, Ziegler W, Boucot A J, Bassett M G, Remane J. 1986. Guidelines and Statutes of the International Commission on Stratigraphy (ISC). Cour Forsch-Inst Senckenberg, 83: 1–14

Dames W. 1883. Cambrische Trilobiten von Liaonung. In: Richthofen F, ed. Beiträge zur Paläontologie von China. Besondere Ausgabe von F v Richthofens China. Part 4. Berlin: Verlag von Dietrich Reimer. 3–33

Demindenko Y E, Parkhaev P Yu, Rozanov A Yu. 2012. Morphological variability and types of preservation of *Mobergella radiolata*—A potential index species for the GSSP of Cambrian Stage 3. J Guizhou Univ, 29: 157–158

Deprat J. 1912. Pt. I, Géologie Générate. In: Depart J, Mansuy H, eds. Etude géologique du Yunnan Oriental. Mém Servo Géol Indochine, v.I, Fasc. I.: 1–62

Devaere L, Clausen S, Steiner M, Álvaro J J, Vachard D. 2013. Chronostratigraphic and palaeogeographic significance of an early Cambrian microfauna from the *Heraultia* Limestone, northern Montagne Noire, France. Palaeont Electronica, 16: 17A. 1–91

Dong L, Xiao S H, Shen B, Zhou C M, Li G X, Yao J X. 2009. Basal Cambrian microfossils from the Yangtze Gorges area (south China) and the Aksu area (Tarim Block, northwestern China). J Paleontol, 83: 30–44

Dong L, Xiao S, Shen B, Zhou C. 2008. Silicified *Horodyskia* and *Palaeopascichnus* from upper Ediacaran cherts in South China: Tentative phylogenetic interpretation and implications for evolutionary stasis. J Geol Soc, 165: 367–378

Dong X P, Repetski J E, Bergström S M. 2004. Conodont biostratigraphy of the Middle Cambrian through lowermost Ordovician in Hunan, South China. Acta Geol Sin-Engl Ed, 78: 1185–1206

Dong X, Zhang H. 2017. Middle Cambrian through lowermost Ordovician conodonts from Hunan, South China. J Paleontol, 91: 1–89

Fan R, Lu Y Z, Zhang X L, Zhang S B, Deng S H, Li X. 2013. Conodonts from the Cambrian-Ordovician boundary interval in the southeast Margin of the Sichuan Basin, China. J Asian Earth Sci, 64: 115–124

Fletcher T P. 2001. *Ovatoryctocara granulata* Bergstrom: A key species

for the correlation of a global Cambrian stage boundary. In: Peng S, Babcock L E, Zhu M, eds. Cambrian System of South China. Palaeoworld, 13: 257–260

Fletcher T P. 2003. *Ovatoryctocara granulata*: The key to a global Cambrian stage boundary and the correlation of the olenellid, redlichiid and paradoxidid realms. Spec Papers Palaeontol, 70: 73–102

Gehling J G, Jensen S, Droser M L, Myrow P M, Narbonne G M. 2001. Burrowing below the basal Cambrian GSSP, fortune head, Newfoundland. Geol Mag, 138: 213–218

Gerhardt A M, Gill B C. 2016. Elucidating the relationship between the later Cambrian end-Marjuman extinctions and SPICE Event. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 461: 362–373

Geyer G. 1990. Correlation along the Lower/Middle Cambrian boundary—A puzzling story with an elusory end? In: Repina L N, Zhuravlev A Y, eds. Tretiy Mezhdunarodnyy Simpozium Po Kembriyskoy Sisteme. Novosibirsk: Tezisy dokladov. 100–102

Geyer G. 1996. The Moroccan fallotaspidid trilobites revisited. Beringeria, 18: 89–199

Geyer G. 2005. The base of a revised Middle Cambrian: Are suitable concepts for a series boundary in reach? Geosci J, 9: 81–99

Geyer G. 2015. Exotic trilobites from the Lower-Middle Cambrian boundary interval in Morocco and their bearing on the Cambrian Series 3 lower boundary. Paläontol Z, 89: 749–781

Geyer G, Landing E. 2016. The Precambrian-Phanerozoic and Ediacaran-Cambrian boundaries: A historical approach to a dilemma. In: Brasier A T, McIlroy D, McLoughlin N, eds. Earth System Evolution and Early Life: A Celebration of the Work of Martin Brasier. Geol Soc Lond Spec Publ, 448: 311–349

Geyer G, Palmer A R. 1995. Neltneriidae and Holmiidae (Trilobita) from Morocco and the problem of Early Cambrian intercontinental correlation. J Paleontol, 69: 459–474

Geyer G, Shergold J. 2000. The quest for internationally recognized divisions of Cambrian time. Episodes, 23: 188–195

Gill B C, Lyons T W, Young S A, Kump L R, Knoll A H, Saltzman M R. 2011. Geochemical evidence for widespread euxinia in the Later Cambrian ocean. Nature, 469: 80–83

Gozalo R, Álvarez M E D, Vintaned J A G, Zhuravlev A Y, Bauluz B, Subías I, ChirivellaMartorell J B, Mayoral E, Gursky H J, Andrés J A, Liñán E. 2013. Proposal of a reference section and point for the Cambrian Series 2–3 boundary in the Mediterranean subprovince in Murero (NE Spain) and its intercontinental correlation. Geol J, 48: 142–155

Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, Bleeker W, Lourens L J. 2004. A new Geologic Time Scale, with special reference to Precambrian and Neogene. Episodes, 27: 83–100

Grossman E L. 2012. Oxygen isotope stratigraphy. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G M, eds. The Geologic Time Scale 2012, vol. 2. Amsterdam: Elsevier BV. 181–206

Grotzinger J P, Bowring S A, Saylor B Z, Kaufman A J. 1995. Biostratigraphic and geochronologic constraints on early animal evolution. Science, 270: 598–604

Gubanov A P, Kouchinsky A V, Peel J S. 1999. The first evolutionary-adaptive lineage within fossil molluscs. Lethaia, 32: 155–157

Gubanov A P. 1998. The Early Cambrian molluscan evolution and its palaeogeographic implications. Acta Univ Carol Geol, 42: 419–422

Gubanov A P. 2001. The biostratigraphic potential of early Cambrian molluscs. In: Peng S C, Babcock L E, Zhu M Y, eds. Cambrian System of South China. Palaeoworld, 13: 262

Guo Q J, Deng Y N, Hu J, Wang L. 2017. Carbonate carbon isotope evolution of seawater across the Ediacaran-Cambrian transition: Evidence from the Keping area, Tarim Basin, NW China. Geol Mag, 154: 1244–1256

Guo Q J, Strauss H, Zhu M Y, Zhang J M, Yang X L, Lu M, Zhao F C. 2013. High resolution organic carbon isotope stratigraphy from a slope to basinal setting on the Yangtze Platform, South China: Implications for the Ediacaran-Cambrian transition. Precambrian Res, 225: 209–217

Guo Q J, StraussHLiu C Q, Zhao Y L, Yang X L, Peng J, Yang H. 2010. A negative carbon isotope excursion defines the boundary from Cambrian Series 2 to Cambrian Series 3 on the Yangtze Platform, South China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 285: 143–151

Halverson G P, Dudás F Ö, Maloof A C, Bowring S A. 2007. Evolution of the $^{87}Sr/^{86}Sr$ composition of Neoproterozoic seawater. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 256: 103–129

Harland W B, Armstrong R L, Cox A V, Craig L E, Smith A G, Smith D G. 1990. A Geologic Time Scale 1989. Cambridge: Cambridge University Press. 263

Harland W B, Cox A V, Llewellyn P G, Smith A G, Pickton C A G, Walters R. 1982. A Geologic Time Scale. Cambridge: Cambridge University Press. 131

Harvey T H P, Williams M, Condon D J, Wilby P R, Siveter D J, Rushton A W A, Leng M J, Gabbott S E. 2011. A refined chronology for the Cambrian succession of southern Britain. J Geol Soc, 168: 705–716

He T C, Zhou Y, Vermeesch P, Rittner M, Miao L Y, Zhu M Y, Carter A, von S P A E P, Shields G A. 2017. Measuring the ‘great unconformity’ on the North China Craton using new detrital zircon age data. Geol Soc Lond Spec Publ, 448: 145–159

Hollingsworth J S. 2007. Fallotaspidoid trilobite assemblage from the Esmeralda Basin (western Nevada, U.S.A.). AAP Memoir, 33: 123–140

Hollingsworth J S. 2011. Lithostratigraphy and biostratigraphy of Cambrian Stage 3 in western Nevada and eastern California. Museum Northern Arizona Bull, 67: 26–42

Hough M L, Shields G A, Evins L Z, Strauss H, Henderson R A, Mackenzie S. 2006. AMajor sulphur isotope event at c. 510 Ma: A possible anoxia-extinction-volcanism connection during the Early-Middle Cambrian transition? Terr Nova, 18: 257–263

Howley R A, Jiang G. 2010. The Cambrian Drumian carbon isotope excursion (DICE) in the Great Basin, western United States. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 296: 138–150

Ishikawa T, Ueno Y, Shu D, Li Y, Han J, Guo J, Yoshida N, Komiya T. 2013. Irreversible change of the oceanic carbon cycle in the earliest Cambrian: High-resolution organic and inorganic carbon chemostratigraphy in the Three Gorges area, South China. Precambrian Res, 225: 190–208

Ishikawa T, Ueno Y, Komiya T, Sawaki Y, Han J, Shu D, Li Y, Maruyama S, Yoshida N. 2008. Carbon isotope chemostratigraphy of a Precambrian/Cambrian boundary section in the Three Gorge area, South China: Prominent global-scale isotope excursions just before the Cambrian explosion. Gondwana Res, 14: 193–208

Jacquet S M, Brougham T, Skovsted C B, Jago J B, Laurie J R, Betts M J, Topper T P, Brock G A. 2017. *Watsonella crosbyi* from the lower Cambrian (Terreneuvian, Stage 2) Normanville Group in South Australia. Geol Mag, 154: 1088–1104

Jell P A. 1990. Trilobita. In: Bengtson S, Conway Morris S, Cooper B J, Jell P A, Runnegar B N, eds. Early Cambrian Fossils from South Australia. AAP Memoir, 9: 257–322

Jensen S. 1997. Trace fossils from the Lower Cambrian Mickwitzia Sandstone, south-central Sweden. Fossils Strata, 42: 1–110

Jensen S, Harper D A T, Stouge S. 2016. Trace fossils from the lower Cambrian Kløftelv Formation, Ella Ø, North-East Greenland. GFF, 138: 369–376

Jensen S, Runnegar B N. 2005. A complex trace fossil from the Spitskop Member (terminal Ediacaran-Lower Cambrian) of southern Namibia. Geol Mag, 142: 561–569

Jensen S, Saylor B Z, Gehling J G, Germs G J B. 2000. Complex trace fossils from the terminal Proterozoic of Namibia. Geology, 28: 143–146

Jiang G, Wang X, Shi X, Xiao S, Zhang S, Dong J. 2012. The origin of decoupled carbonate and organic carbon isotope signatures in the early Cambrian (ca. 542–520 Ma) Yangtze platform. Earth Planet Sci Lett, 317-318: 96–110

Jiang S Y, Pi D H, Heubeck C, Frimmel H, Liu Y P, Deng H L, Ling H F, Yang J H. 2009. Early Cambrian ocean anoxia in South China. Nature, 459: E5–E6

Jourdan F, Hodges K, Sell B, Schaltegger U, Wingate M T D, Evins L Z, Soderlund U, Haines P W, Phillips D, Blenkinsop T. 2014. High-precision dating of the Kalkarindji large igneous province, Australia, and synchrony with the Early-Middle Cambrian (Stage 4–5) extinction. Geology, 42: 543–546

Khomentovsky V V, Karlova G A. 2005. The Tommotian Stage base as the Cambrian Lower Boundary in Siberia. Stratigr Geol Correl, 13: 21–34

Kimura H, Matsumoto R, Kakuwa Y, Hamdi B, Zibaseresht H. 1997. The Vendian-Cambrian $\delta^{13}C$ record, North Iran: Evidence for overturning of the ocean before the Cambrian Explosion. Earth Planet Sci Lett, 147: E1–E7

Knoll A H, Kaufman A J, Semikhatov M A, Grotzinger J P, Adams W. 1995. Sizing up the sub-Tommotian unconformity in Siberia. Geology, 23: 1139–1143

Korovnikov I V. 2012. Correlation potential FADs of the *Triangulaspis annio* and *Hebediscus attleborensis* on the Siberian platform (a possible GSSP for the lower boundary of the Cambrian Stage 4). J Guizhou Univ, 29: 169–170

Kouchinsky A, Bengtson S, Landing E, Steiner M, Vendrasco M, Ziegler K. 2017. Terreneuvian stratigraphy and faunas from the Anabar Uplift, Siberia. Acta Palaeont Pol, 62: 311–440

Kouchinsky A, Bengtson S, Pavlov V, Runnegar B, Torssander P, Young E, Ziegler K. 2007. Carbon isotope stratigraphy of the Precambrian-Cambrian Sukharikha River section, northwestern Siberian platform. Geol Mag, 144: 609

Kruse P D, Zhuravlev A Yu, Parkhaev P Yu, Zhu M. 2017. Comment: A new lower Cambrian shelly fossil biostratigraphy for South Australia by Marissa J. Betts, John R. Paterson, James B. Jago, Sarah M. Jacquet, Christian B. Skovsted, Timothy P. Topper & Glenn A. Brock. Gondwana Res, 44: 258–261

Landing E. 1994. Precambrian-Cambrian boundary global stratotype ratified and a new perspective of Cambrian time. Geology, 22: 179–182

Landing E, Geyer G, Brasier M D, Bowring S A. 2013. Cambrian evolutionary radiation: Context, correlation, and chronostratigraphy—Overcoming deficiencies of the first appearance datum (FAD) concept. Earth-Sci Rev, 123: 133–172

Landing E, Geyer G. 2012. Misplaced faith-limitations of the first appearance datum (FAD) in chronostratigraphy and proposal of more robust Lower Cambrian correlation standards. J Guizhou Univ, 29: 170–171

Landing E, Kouchinsky A. 2016. Correlation of the Cambrian Evolutionary Radiation: Geochronology, evolutionary stasis of earliest Cambrian (Terreneuvian) small shelly fossil (SSF) taxa, and chronostratigraphic significance. Geol Mag, 153: 750–756

Landing E, Kruse P D. 2017. Integrated stratigraphic, geochemical, and

paleontological late Ediacaran to early Cambrian records from southwestern Mongolia: Comment. Geol Soc Am Bull, 129: 1012–1015

Landing E, Peng S C, Babcock L E, Geyer G, Moczydłowska-Vidal M. 2007. Global standard names for the Lowermost Cambrian Series and Stage. Episodes, 30: 287–299

Landing E, Westrop S R, Adrain J M. 2011. The Lawsonian Stage-the Eoconodontus notchpeakensis FAD and HERB carbon isotope excursion define a globally correlatable terminal Cambrian stage. Bull Geosci, 86: 621–640

Landing E, Westrop S R. 1998. AVALON 1997-the Cambrian standard: Third International Field Conference of the Cambrian Chronostratigraphy Working Group and I.G.C.P. Project 366, Ecological Aspects of the Cambrian Radiation. New York State Museum Bull. 49

Lantenois H. 1907. Résultats de la mission géologique et miniére du Yunnan méridional. I: Note sur la géologie et les mines de la region comprise entre Lao-Kay et Yunnan-Sen. Ann. Mines. 1–134

Lapworth C. 1879. On the tripartite classification of the Lower Paleozoic rocks. Geol Mag, 6: 1–15

Lazarenko N P, Gogin I Y, Pegel T V, Abaimova G P. 2011. The Khos-Nelege River section of the Ogon'or Formation: A potential candidate for the GSSP of Stage 10, Cambrian System. Bull Geosci, 86: 555–568

Lee L S, Chao Y T. 1924. Geology of the Gorge district of the Yangtze (from Ichang to Tzekuei) with special reference to the development of the Gorges. Bull Geol Soc China, 3: 351–391

Li D D, Zhang X L, Chen K F, Zhang G J, Chen X Y, Huang W, Peng S C, Shen Y A. 2017. High-resolution C-isotope chemostratigraphy of the uppermost Cambrian stage (Stage 10) in South China: Implications for defining the base of Stage 10 and palaeoenvironmental change. Geol Mag, 154: 1232–1243

Li D, Ling H F, Shields-Zhou G A, Chen X, Cremonese L, Och L, Thirlwall M, Manning C J. 2013. Carbon and strontium isotope evolution of seawater across the Ediacaran-Cambrian transition: Evidence from the Xiaotan section, NE Yunnan, South China. Precambrian Res, 225: 128–147

Li D, Ling H F, Jiang S Y, Pan J Y, Chen Y Q, Cai Y F, Feng H Z. 2009. New carbon isotope stratigraphy of the Ediacaran-Cambrian boundary interval from SW China: Implications for global correlation. Geol Mag, 146: 465–483

Li G X, Zhang J M, Zhu M Y. 2001. Litho- and biostratigraphy of the Lower Cambrian Meishucunian Stage in the Xiaotan section, eastern Yunnan. Acta Palaeont Sin, 40(Suppl): 40–53

Li G, Zhao X, Gubanov A, Zhu M, Na L. 2011. Early Cambrian mollusc *Watsonella crosbyi*: A potential GSSP index fossil for the base of the Cambrian Stage 2. Acta Geol Sin-Engl Ed, 85: 309–319

Lin H L. 2008. Chapter 3, Early Cambrian (Chiungchussuan, Tsanglangpuan and Lungwangmian). In: Zhou Z Y, Zhen Y Y, eds. Trilobite Record of China. Beijing: Science Press. 36–76

Linnemann U, Ovtcharova M, Schaltegger U, Vickers-Rich P, Gärtner A, Hofmann M, Zieger J, Krause R, Kriesfeld L, Smith J. 2017. New chronological and stratigraphic constrains on the Precambrian-Cambrian boundary (Swaetpunt section, South Namibia). In: McIlroy G, ed. Abstract Volume of the International Symposium on the Ediacaran-Cambrian Transition. 63

Liu H, Liao Z, Zhang H, Tian Y, Cheng B, Yang S. 2016. Stable isotope ($\delta^{13}C_{ker}$, $\delta^{13}C_{carb}$, $\delta^{18}O_{carb}$) distribution along a Cambrian outcrop section in the eastern Tarim Basin, NW China and its geochemical significance. Geosci Front, 8: 163–170

Lu Y H. 1941. Lower Cambrian stratigraphy and trilobite fauna of Kunming, Yunnan. Bull Geol Soc China, 21: 71–90

Lu Y H. 1945. Early Middle Cambrian faunas from Meitan. Bull Geol Soc China, 25: 185–199

Macdonald F A, Pruss S B, Strauss J V. 2014. Trace fossils with spreiten from the Late Ediacaran Nama Group, Namibia: Complex feeding patterns five million years before the Precambrian-Cambrian boundary. J Paleontol, 88: 299–308

Magaritz M, Holser W T, Kirschvink J L. 1986. Carbon-isotope events across the Precambrian/Cambrian boundary on the Siberian Platform. Nature, 320: 258–259

Magaritz M, Kirschvink J L, Latham A J, Zhuravlev A Y, Rozanov A Y. 1991. Precambrian/Cambrian boundary problem: Carbon isotope correlations for Vendian and Tommotian time between Siberia and Morocco. Geology, 19: 847–850

Maloof A C, Porter S M, Moore J L, Dudas F O, Bowring S A, Higgins J A, Fike D A, Eddy M P. 2010. The earliest Cambrian record of animals and ocean geochemical change. Geol Soc Am Bull, 122: 1731–1774

Mansuy H. 1907. Résultats de la mission géologique et miniére du Yunnan méridional. III: Résultats Paléontologiques. Ann Mines, 153–200

Mansuy H. 1912. Pt. II, Paléontogie. In: Deprat J. and Mansuy, Etude géologique du Yunnan Oriental. Mém. Servo Géol. Indochine, v.I, Fasc.II: 1–31

McArthur J M, Howarth R J, Shields G A. 2012. Strontium isotope stratigraphy. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G M, eds. The Geologic Time Scale 2012, vol. 2. Amsterdam: Elsevier BV. 127–144

McNamara K, Feng Y, Zhou Z. 2003. Ontogeny and heterochrony in the oryctocephalid trilobite *Arthricocephalus* from the Early Cambrian of China. Spec Pap Palaeontol, 70: 103–126

Miller J F, Evans K R, Ethington R L, Holmer L E, Loch J D, Popov L

E, Ripperdan R L. 2005. GSSP candidate for the base of the highest Cambrian stage at Lawson Cove, Utah, USA. In: Peng S C, Zhu M Y, Li G X, Van Iten H, eds. Abstract and Short Papers. Acta Micropalaeont Sin, (Suppl): 115–116

Miller J F, Evans K R, Freeman R L, Ripperdan R L, Taylor J F. 2011. Proposed stratotype for the base of the Lawsonian Stage (Cambrian Stage 10) at the First Appearance Datum of *Eoconodontus notchpeakensis* (Miller) in the House Range, Utah, USA. Bull Geosci, 86: 595–620

Miller J F, Ripperdan R L, Loch J D, Freeman R L, Evans K R, Taylor J F, Tolbart Z C. 2015. Proposed GSSP for the base of Cambrian Stage 10 at the lowest occurrence of *Eoconodontus notchpeakensis* in the House Range, Utah, USA. Annales de Paléontologie, 101: 199–211

Miller J F, Ethington R L, Evans K R, Holmer L E, Loch J D, Popov L E, Repetski J E, Ripperdan R L, Taylor J F. 2006. Proposed stratotype for the base of the highest Cambrian stage at the first appearance datum of *Cordylodus andresi*, Lawson Cove section, Utah, USA. Palaeoworld, 15: 384–405

Missarzhevsky V V. 1989. The earliest skeletal fossils and stratigraphy of the Precambrian-Cambrian Boundary Beds. Tr Geol Inst Akad Nauk SSSR, 443: 1–237

Moczydłowska M. 1991. Acritarch biostratigraphy of the Lower Cambrian and the Precambrian-Cambrian boundary in southeastern Poland. Fossils Strata, 29: 1–127

Moczydłowska M, Yin L M. 2012. The lower Cambrian phytoplankton record in China and global perspective for stage subdivision. J Guizhou Univ-Nat Sci, 29: 176–177

Moczydłowska M, Zang W L. 2006. The Early Cambrian acritarch *Skiagia* and its significance for global correlation. Palaeoworld, 15: 328–347

Monke H. 1903. Bietrage zur Geology van Schantung. 1, Obercambriche Trilobiten van Yen-Tsy-Tai. Berlin: Jahrbuch der Königliche Preussische Geologische Landesanstalt, 23: 103–151

Montañez I P, Osleger D A, Banner J L. 2000. Evolution of the Sr and C isotope composition of Cambrian oceans. GSA Today, 10: 1–7

Narbonne G M, Myrow P M, Landing E, Anderson M M. 1987. A candidate stratotype for the Precambrian-Cambrian boundary, Fortune Head, Burin Peninsula, southeastern Newfoundland. Can J Earth Sci, 24: 1277–1293

Narbonne G M, Xiao S, Shields G A. 2012. The Ediacaran Period. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G M, eds. The Geologic Time Scale 2012, vol. 2. Amsterdam: Elsevier BV. 413–435

Ng T W, Yuan J L, Lin J P. 2014a. The North China steptoean positive carbon isotope excursion and its global correlation with the base of the Paibian Stage (early Furongian Series), Cambrian. Lethaia, 47: 153–164

Ng T W, Yuan J L, Lin J P. 2014b. The North China steptoean positive Carbon isotope event: New insights towards understanding a global phenomenon. Geobios, 47: 371–387

Nielsen A T, Schovsbo N H. 2015. The regressive Early-Mid Cambrian 'Hawke Bay Event' in Baltoscandia: Epeirogenic uplift in concert with eustasy. Earth-Sci Rev, 151: 288–350

Norin E. 1937. Geology of western Quruq Tagh, eastern T'ien Shan. In: Reports from the scientific expedition to the northwestern provinces of China under leadership of Dr. Sven Hedin. Sino-Swedish Expeditio III. Geology (1). Stockholm: Tryckeri Aktiebolaget Thule. 1–194

Okada Y, Sawaki Y, Komiya T, Hirata T, Takahata N, Sano Y, Han J, Maruyama S. 2014. New chronological constraints for Cryogenian to Cambrian rocks in the Three Gorges, Weng'an and Chengjiang areas, South China. Gondwana Res, 25: 1027–1044

Pagès A, Schmid S. 2016. Euxinia linked to the Cambrian Drumian carbon isotope excursion (DICE) in Australia: Geochemical and chemostratigraphic evidence. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 461: 65–76

Palmer A R. 1998a. A proposed nomenclature for stages and series for the Cambrian of Laurentia. Can J Earth Sci, 35: 323–328

Palmer A R. 1998b. Why is intercontinental correlation within the Lower Cambrian so difficult? Revista Española de Paleontología, No. extr. Homenaje al Prof. Gonzalo Vidal. 17–21

Parkhaev P Y, Karlova G A, Rozanov A Yu. 2011. Taxonomy, stratigraphy and biogeography of *Aldanella attleborensis*-a possible candidate for defining the base of Cambrian Stage 2. Museum Northern Arizona Bull, 67: 298–300

Parkhaev P Y, Karlova G A, Rozanov A Y. 2012. Stratigraphic distribution of two potential species for the GSSP of Cambrian Stage 2-*Aldanella attleborensis* and *Watsonella crosbyi*. J Guizhou Univ, 29(Suppl): 179–180

Peng S C. 2003. Chronostratigraphic subdivision of the Cambrian of China. Geol Acta, 1: 135–144

Peng S C. 2004. Suggested global subdivision of Cambrian System and two potential GSSPs in Hunan, China for defining Cambrian stages. In: Choi D K, ed. Ninth International Conference of the Cambrian Stage Subdivision Working Group. Abstracts with Program. Taebaek, Korea. 25

Peng S C, Babcock L E. 2005. Two Cambrian agnostoid trilobites, *Agnostotes orientalis* (Kobayashi, 1935) and *Lotagnostus americanus* (Billings, 1860): Key species for defining global stages of the Cambrian System. Geosci J, 9: 107–115

Peng S C, Babcock L E. 2011. Continuing progress on chronostrati-

graphic subdivision of the Cambrian System. Bull Geosci, 86: 391–396

Peng S C, Babcock L E, Robison R A, Lin H L, Ress M N, Saltzman M R. 2004. Global standard stratotype-section and point (GSSP) of the Furongian Series and Paibian Stage (Cambrian). Lethaia, 37: 365–379

Peng S C, Robison R A. 2000. Agonstoid biostratigraphy across the Middle-Upper Cambrian boundary in China. Paleontological Society Memoir 53. J Paleont, 74: 1–104

Peng S C, Babcock L E, Cooper R. 2012a. The Cambrian Period. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G M, eds. The Geologic Time Scale 2012, vol. 2. Amsterdam: Elsevier BV. 437–488

Peng S C, Babcock L E, Zuo J X, Zhu X J, Lin H L, Yang X F, Qi Y P, Bagnoli G, Wang L W. 2012b. Global standard stratotype-section and point (GSSP) for the base of the Jiangshanian Stage (Cambrian: Furongian) at Duibian, Jiangshan, Zhejiang, Southeast China. Episodes, 35: 462–477

Peng S C, Zhou Z Y, Lin T R. 1998. Late Middle-Late Upper Cambrian chronostratigraphy of China. In: Ahlberg P, Eriksson M, Olsson I, eds. Abstract for the IV Field Conference of the Cambrian Stage Subdivision Working Group, International Subcommission on Cambrian, Lund, Lund University. 20

Peng S C, Babcock L E, Zhu X J, Zuo J X. 2013. A potential GSSP for the base of the uppermost Cambrian stage (Furongian Series) coinciding with the first appearance of *Lotagnostus americanus* at Waergang, Hunan, China. In: Lindskog A, Mehlqvist K, eds. Proceedings of the 3rd IGCP 591 Annual Meeting-Lund, Sweden, 9–19 June 2013. Lund University. 265–266

Peng S C, Babcock L E, Zhu X J, Zuo J X, Dai T. 2014. A potential GSSP for the base of the uppermost Cambrian stage, coinciding with the first appearance of *Lotagnostus americanus* at Wa'ergang, Hunan, China. GFF, 136: 208–213

Peng S C, Babcock L E, Zhu X J, Ahlberg P, Terfelt F, Dai T. 2015. Intraspecific variation and taphonomic alteration in the Cambrian (Furongian) agnostoid *Lotagnostus americanus*: New information from China. Bull Geosci, 90: 281–306

Peng S C, Babcock L E, Zhu X J, Lei Q, Dai T. 2017. Revision of the oryctocephalid trilobite genera *Arthricocephalus* Bergeron and *Oryctocarella* Tomashpolskaya and Karpinski (Cambrian) from South China and Siberia. J Paleontol, 91: 933–959

Peng S C, Babcock L E, Zuo J X, Lin H L, Zhu X J, Yang X F, Robison R A, Qi Y P, Bagnoli G, Chen Y. 2009. The global boundary stratotype section and point of the Guzhangian Stage (Cambrian) in the Wuling Mountains, northwestern Hunan, China. Episodes, 32: 41–55

Qian Y, Li G X, Zhu M Y. 2001. The Meishucunian Stage and its small shelly fossil sequences in China. Acta Palaeont Sin, 40(Suppl): 54–62

Qian Y, Zhu M Y, Li G X, Jiang Z W, Van Iten H. 2002. A supplemental Precambrian-Cambrian boundary global stratotype section in SW China. Acta Palaeont Sin, 41: 19–26

Remané J, Bassett M G, Cowie J W, Gohrbandt K H, Lane H R, Michelsen O, Wang N. 1996. Revised guidelines for the establishment of global chronostratigraphic standards by the International Commission on Stratigraphy (ICS). Episodes, 19: 77–81

Richthofen F F von 1877. China, Parts 1. Berlin: Verlag von Dietrich Reimer. 758

Ripperdan R L. 2002. The HERB Event: End of Cambrian carbon cycle paradigm? Geol Soci Amer Abstracts Programs, 34: 413

Ripperdan R L, Magaritz M, Nicoll R S, Shergold J H. 1992. Simultaneous changes in carbon isotopes, sea level, and conodont biozones within the Cambrian-Ordovician boundary interval at Black Mountain, Australia. Geology, 20: 1039–1042

Ripperdan R L, Miller J F. 1995. Carbon isotope ratios from the Cambrian-Ordovician boundary section at Lawson Cove, Ibex area, Utah. In: Cooper J D, Droser M L, Finney S C, eds. Ordovician Odyssey: Short Papers for the Seventh International Symposium on the Ordovician System. Pacific Section SEPM, Fullerton, California. 129–132

Robison R A, Rosova A V, Rowell A J, Fletcher T P. 1977. Cambrian boundaries and divisions. Lethaia, 10: 257–262

Rogov V I, Karlova G A, Marusin V V, Kochnev B B, Nagovitsin K E, Grazhdankin D V. 2015. Duration of the first biozone in the Siberian hypostratotype of the Vendian. Rus Geol Geophys, 56: 573–583

Rozanov A Au, Semikhatov M A, Sokolov B S, Fedonkin M A, Khomentovskii V V. 1997. The decision on the Precambrian-Cambrian boundary Stratotype: A breakthrough or misleading action? Stratigr Geol Correl, 5: 19–28

Rozanov A Yu, Missarzhevsky V V, Volkova N A, Voronova L G, Krylov I N, Keller B M, Korolyuk I K, Lenozion K, Mikhnyak R, Pykhova N G, Sidorov A D. 1969. The Tommotian Stage and the Cambrian lower boundary problem. Tr Geol Inst Akad Nauk SSSR, 206: 1–379

Rozanov A Yu, Khomentovsky V V, Shabanov Yu Ya, Karlova G A, Varlamov A I, Luchinina V A, Pegel T V, Demidenko Yu E, Parkhaev P Yu, Korovnikov I V, Skorlotova N A. 2008a. To the problem of stage subdivision of the Lower Cambrian. Stratigr Geol Correl, 16: 1–19

Rozanov A Yu, Parkhaev P Yu, Demidenko Yu E, Skorlotova N A. 2011. *Mobergella radiolata*—A possible candidate for defining the

base of Cambrian Series 2 and Stage 3. Mus Northern Arizona Bull, 67: 304–306

Rozanov A Yu, Zhu M Y, Pak K L, Parkhaev P Yu. 2008b. The second Sino-Russian Symposium on the Lower Cambrian Subdivision. Palaeont J, 42: 442–416

Rozanov A Yu. 1992. Some problems concerning the Precambrian-Cambrian transition and the Cambrian faunal radiation. J Geol Soc, 149: 593–598

Saltzman M R. 2005. Phosphorus, nitrogen, and the redox evolution of the Paleozoic oceans. Geology, 33: 573–576

Saltzman M R, Ripperdan R L, Brasier M D, Lohmann K C, Robison R A, Chang W T, Peng S, Ergaliev E K, Runnegar B. 2000. A global carbon isotope excursion (SPICE) during the Late Cambrian: Relation to trilobite extinctions, organic-matter burial and sea level. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 162: 211–223

Saltzman M R, Thomas E. 2012. Carbon isotope stratigraphy. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G M, eds. The Geologic Time Scale 2012, vol. 2. Amsterdam: Elsevier BV. 207–232

Saltzman M R, Young S A, Kump L R, Gill B C, Lyons T W, Runnegar B. 2011. Pulse of atmospheric oxygen during the late Cambrian. Proc Natl Acad Sci USA, 108: 3876–3881

Salvador A. 1994. International stratigraphic guide-a guide to stratigraphic classification, terminology and procedure. Second Edition. IUGS & Geol Soc Am, Inc. 1–214

Schmitz M D. 2012. Radiogenic isotope geochronology. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G M, eds. The Geologic Time Scale 2012, vol. 2. Amsterdam: Elsevier BV. 115–126

Sedgwick A. 1852. On the classification and nomenclature of the Lower Palaeozoic rocks of England and Wales. Q J Geol Soc, 8: 136–168

Shergold J, Geyer G. 2001. The International Subcommission on Cambrian Stratigraphy: Progress report 2001. Acta Palaeont Sin, 40 (Suppl): 1–3

Shergold J, Geyer G. 2003. The subcommission on Cambrian stratigraphy: The status quo. Geol Acta, 1: 5–9

Shields G A. 2007. A normalised seawater strontium isotope curve: Possible implications for Neoproterozoic-Cambrian weathering rates and the further oxygenation of the Earth. eEarth, 2: 35–42

Sial A N, Peralta S, Ferreira V P, Toselli A J, Aceñolaza F G, Parada M A, Gaucher C, Alonso R N, Pimentel M M. 2008. Upper Cambrian carbonate sequences of the Argentine Precordillera and the Steptoean C-Isotope Positive Excursion (SPICE). Gondwana Res, 13: 437–452

Skovsted C B. 2003. Mobergellans (Problematica) from the Cambrian of Greenland, Siberia and Kazakhstan. Paläontol Z, 77: 429–443

Smith E F, Macdonald F A, Petach T A, Bold U, Schrag D P. 2016b. Integrated stratigraphic, geochemical, and paleontological late Ediacaran to early Cambrian records from southwestern Mongolia. Geol Soc Am Bull, 128: 442–468

Smith E F, Nelson L L, Strange M A, Eyster A E, Rowland S M, Schrag D P, Macdonald F A. 2016a. The end of the Ediacaran: Two new exceptionally preserved body fossil assemblages from Mount Dunfee, Nevada, USA. Geology, 44: 911–914

Steiner M, Li G X, Qian Y, Zhu M Y, Erdtmann B D. 2007. Neoproterozoic to Early Cambrian small shelly fossil assemblages and a revised biostratigraphic correlation of the Yangtze Platform (China). Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 254: 67–99

Steiner M, Li G X, Yang B, Ergaliev G. 2013. Chemostratigraphy versus biostratigraphy for a chronostratigraphic subdivision of the traditional “Lower Cambrian”. In: Lindskog A, Mehlqvist K, eds. Proceedings of the 3rd IGCP 591 Annual Meeting-Lund, Sweden, 9–19 June 2013. Lund University. 303–304

Steiner M, Li G X. 2009. The potential of small shelly fossils for subdivision of the traditional Lower Cambrian. In: Ergaliev G K, Nikitina O I, Zhemchuzhnikov Y G, Popov L E, Basset M G, eds. Stratigraphy, Fossils and Progress of International Stratigraphic Scale of Cambrian System. Materials of the 14th International Field Conference of Excursion of the Cambrian Stages Subdivision Working Group. Almaty-Lesser Kalatau Ridge, South Kazakhstan, August 24–September 02, 2009. Almaty: Gylym. 33–34

Steiner M, Li G, Ergaliev G. 2011. Toward a subdivision of the traditional “Lower Cambrian”. Museum Northern Arizona Bull, 67: 306–308

Steiner M, Yang B. 2017. The chronostratigraphic subdivision of the traditional “Lower Cambrian”–How reliable are chemostratigraphy and biostratigraphy? In: McIlroy G, ed. Abstract Volume of the International Symposium on the Ediacaran-Cambrian Transition. 113

Steiner M, Zhu M Y, Weber B, Geyer G. 2001. The Lower Cambrian in eastern Yunnan: Trilobite-based biostratigraphy and related faunas. Acta Palaeont Sin, 40(Suppl): 63–79

Sun Y C. 1924. Contribution to the Cambrian fauna of North China. Plaleontol Sin-Ser B, 1: 1–109

Sun Y C. 1935. The Upper Cambrian trilobite fauna of North China. Plaleontol Sin-Ser B, 7: 1–93

Sundberg F A, Geyer G, Kruse P D, McCollum L B, Pegel T V, Żylińska A, Zhuravlev A Yu. 2016. International correlation of the Cambrian Series 2–3, Stages 4–5 boundary interval. A P Memoirs, 49: 83–124

Tang Q, Pang K, Yuan X, Wan B, Xiao S. 2015. Organic-walled microfossils from the Tonian Gouhou Formation, Huaibei region, North China Craton, and their biostratigraphic implications.

Precambrian Res, 266: 296–318
Ting V K, Wang Y L. 1937. Cambrian and Silurian Formnations ofMalung and Chütsing district, Yunnan. Bull Geol Soc China, 16: 1–28
Troedsson G T. 1937. On the Cambrian-Ordovician faunas of western Quruq Tagh, eastern Tien-Shan. Palaeont Sin, 106B, 2: 1–74
Walcott C D. 1905. Cambrian faunas of China. Proc U S Natl Mus, 29: 1–106
Walcott C D. 1906. Cambrian faunas of China. Proc United States Natl Museum, 30: 563–595
Wang J G, Chen D Z, Wan D, Yan D T, Zhou X Q. 2012. Petrology and geochemistry of chert on theMarginal zone of Yangtze Platform, western Hunan, South China, during the Ediacaran-Cambrian transition. Sedimentology, 59: 809–829
Wang X L, Hu W X, Yao S P, Chen Q, Xie X M. 2011. Carbon and strontium isotopes and global correlation of Cambrian Series 2-Series 3 carbonate rocks in the Keping area of the northwestern Tarim Basin, NW China. Mar Pet Geol, 28: 992–1002
Wang X Q, Shi X Y, Jiang G Q, Zhang S H. 2012. New U-Pb age from the basal Niutitang Formation in South China: Implications for diachronous development and condensation of stratigraphic units across the Yangtze platform at the Ediacaran-Cambrian transition. J Asian Earth Sci, 48: 1–8
Wood R A, Poulton S W, Prave A R, Hoffmann K H, Clarksona M O, Guilbaud R, Lyne J W, Tostevin R, Bowyer F, Penny A M, Curtis A, Kasemann S A. 2015. Dynamic redox conditions control late Ediacaran metazoan ecosystems in the Nama Group, Namibia: Precambrian Res, 261: 252–271
Xiao S H, Shen B, Tang Q, Kaufman A J, Yuan X L, Li J, Qian M. 2014. Biostratigraphic and chemostratigraphic constraints on the age of early Neoproterozoic carbonate successions in North China. Precambrian Res, 246: 208–225
Xu L G, Lehmann B, Mao J W, Qu W J, Du A D. 2011. Re-Os age of polymetallic Ni-Mo-PGE-Au mineralization in Early Cambrian Black Shales of South China—A Reassessment. Econ Geol, 106: 511–522
Yang A H, Zhu M Y, Zhang J M, Li G X. 2003. Early Cambrian eodiscoid trilobites of the Yangtze Platform and their stratigraphic implications. Prog Nat Sci, 13: 861–866
Yang A H, Zhu M Y, Zhuravlev A Y, Yuan K X, Zhang J M, Chen Y Q. 2016. Archaeocyathan zonation of the Yangtze Platform: Implications for regional and global correlation of lower Cambrian stages. Geol Mag, 153: 388–409
Yang B, Steiner M, Zhu M Y, Li G X, Liu J, Liu P J. 2016. Transitional Ediacaran-Cambrian small skeletal fossil assemblages from South China and Kazakhstan: Implications for chronostratigraphy and metazoan evolution. Precambrian Res, 285: 202–215
Yang C, Li X H, Zhu M Y, Condon D J, Chen J Y. 2018. Geochronological constraint on the Cambrian Chengjiang biota, South China. J Geol Soc, 175: 659–666
Yao J X, Xiao S H, Yin L M, Li G X, Yuan X L. 2005. Basal Cambrian microfossils from the Yurtus and Xishanblaq formations (Tarim, Northwest China): Systematic revision and biostratigraphic correlation of *Micrhystridium*-like acritarchs from China. Palaeontology, 48: 687–708
Yuan J L, Ng T W. 2014. Tentative correlation of the Duyunian (Cambrian Series 2, Stage 4) and the Taijiangian (Cambrian Series 3, Stage 5) between South China and the Mediterranean region. GFF, 136: 314–319
Yuan J L, Zhao Y L, Li Y. 2001. Biostratigraphy of oryctocephalid trilobites. Acta Palaeont Sin, 40(Suppl): 143–156
Yuan J L, Zhao Y L, Peng J, Zhu X J, Lin J P. 2009. Cambrian trilobite *Ovatoryctocara granulata* Tchernysheva, 1962 and its biostratigraphic significance. Prog Nat Sci, 19: 213–221
Yuan J L, Zhao Y L, Yang X L. 2006. Speciation of the genus Arthricocephalus Bergeron, 1899 (Trilobita) from the late early cambrian and its stratigraphic significance. Prog Nat Sci, 16: 614–623
Yuan J L, Zhu X J, Lin J P, Zhu M Y. 2011. Tentative correlation of Cambrian Series 2 between South China and other continents. Bull Geosci, 86: 397–404
Yun H, Zhang X L, Li L Y, Zhang M Q, Liu W. 2016. Skeletal fossils and microfacies analysis of the lowermost Cambrian in the southwestern Margin of the North China Platform. J Asian Earth Sci, 129: 54–66
Zhamoida A I. 2015. General Stratigraphic Scale of Russia: State of the art and problems. Rus Geol Geophys, 56: 511–523
Zhang J M, Li G X, Zhou C M, Zhu M Y, Yu Z Y. 1997. Carbon isotope profiles and their correlation across the Neoproterozoic-Cambrian boundary interval on the Yangtze Platform, China. Bull Natl Mus Nat Sci, 10: 107–116
Zhang W T, Babcock L E, Xiang L W, Sun W G, Luo H L, Jiang Z W. 2001. Lower Cambrian stratigraphy of Chengjiang, eastern Yunnan, China, with special notes on Chinese *Parabadiella*, Moroccan *Abadiella* and Australian *Abadiella huoi*. Acta Palaeont Sin, 40: 294–309
Zhang W T, Xiang L W, Liu Y H, Meng X S. 1995. Cambrian stratigraphy and trilobites from Henan. Palaeont Cathayana, 6: 1–166
Zhang W T. 1987. World's oldest Cambrian trilobites from eastern Yunnan. In: Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Academia Sinica, ed. Stratigraphy and Palaeontology of Systemic

Boundaries in China. Precambrian-Cambrian Boundary 1. Hefei: Anhui Science and Technology Publishing House. 1–16
Zhang X L, Ahlberg P, Babcock L E, Choi D K, Geyer G, Gozalo R, Hollingsworth J S, Li G X, Naimark E B, Pegel T, Steiner M, Wotte T, Zhang Z F. 2017. Challenges in defining the base of Cambrian Series 2 and Stage 3. Earth-Sci Rev, 172: 124–139
Zhao Y L, Peng J, Yuan J L, Babcock L E, Guo Q J, Yin L M, Yang X L, Tai T S, Wang C J, Lin J P, Gaines R R, Sun H J, Yang Y N. 2012. Discussion of candidate stratotypes for the GSSP defining the conterminous base of Cambrian provisional Series 3 and Stage 5. J Guizhou Univ, 29(Suppl): 35–48
Zhao Y L, Yuan J L, Zhu L J, Guo Q J, Yang R D, Yang X L, Tai T S. 2001a. An advance in the research of the Lower-Middle Cambrian boundary in South China and its prospects. J Stratigr, 25(Suppl): 383–390
Zhao Y L, Yu Y Y, Yuan J L, Yang X L, Guo G J. 2001b. Cambrian stratigraphy at Huanliang, Guozhou Province, China: Reference section for the base of the Nangaoan and Duyunian stages. Palaeoworld, 13: 172–181
Zhao Y L, Yuan J L, Esteve J, Peng J. 2017. The oryctocephalid trilobite zonation across the Cambrian Series 2-Series 3 boundary at Balang, South China: A reappraisal. Lethaia, 50: 400–406
Zhao Y L, Yuan J L, Guo Q J, Peng J, Yin L M, Yang Y L, Wang C J, Sun H J. 2014. Comments on some important issues concerning the establishment of a GSSP for Cambrian Stage 5. GFF, 136: 333–336
Zhu M Y. 1997. Precambrian-Cambrian trace fossils from Eastern Yunnan: Implications for Cambrian Explosion. Bull Natl Mus Nat Sci, 10: 275–312
Zhu M Y, Babcock L E, Peng S C. 2006. Advances in Cambrian stratigraphy and paleontology: Integrating correlation techniques, paleobiology, taphonomy and paleoenvironmental reconstruction. Palaeoworld, 15: 217–222
Zhu M Y, Li G X, Zhang J M, Steiner M, Qian Y, Jiang Z W. 2001. Early Cambrian stratigraphy of East Yunnan, southwestern China: A synthesis. Acta Palaeont Sin, 40(Suppl): 4–39
Zhu M Y, Pak K L, Babcock L E, Rozanov A Yu. 2007. Chinese-Russian Symposium on the Lower Cambrian Stratigraphy. Palaeont J, 41: 227–228
Zhu M Y, Yang A H, Li G X, Yuan J M. 2008. A working model for subdivision of the lower half Cambrian. In: Voronin T A, ed. 13th International Field Conference of the Cambrian Stage Subdivision Working Group. The Siberian Platform, Western Yakutia. SNIIG-GiMS, Novosibirsk. 88–90
Zhu M Y, Yang B, Ahn S Y, Tsukui K, Zhuravlev A Yu, Steiner M, Zhao F C, Ramezani J, Wood R A, Bowring S A. 2017b. Insight into the base of the Cambrian: New data from South China and Siberia. In: McIlroy G, ed. Abstract Volume of the International Symposium on the Ediacaran-Cambrian Transition. 135
Zhu M Y, Zhang J M, Babcock L E, Bowring S A, Ahn S Y, He T C, Yang A H, Li G X, Zhao F C, Yin Z J. 2015. Identification and correlation of the Cambrian base: Problems and potential solutions. In: Gülli E, Piller W E, eds. STRATI 2015, Abstract Ber Inst Erdwiss K-F-Univ Graz, Band 21. 436
Zhu M Y, Zhang J M, Li G X, Yang A H. 2004. Evolution of C isotopes in the Cambrian of China: Implications for Cambrian subdivision and trilobiteMass extinctions. Geobios, 37: 287–301
Zhu M Y, Zhang J M, Steiner M, Yang A H, Li G X, Erdtmann B D. 2003. Sinian-Cambrian stratigraphic framework for shallow- to deep-water environments of the Yangtze Platform: An integrated approach. Prog Nat Sci, 13: 951–960
Zhu M Y, Zhang J M, Yang A H, Li G X, Yang X L. 2006b. The First Series of the Cambrian of South China. Subdivision and correlation. In: Jago J B, ed. South Australia 2006. XI International Conference of the Cambrian Subdivision Working Group. South Australia, August 14–24, 2006. Geological Society of Australia, Abstracts Number 84. 43–44
Zhu M Y, Zhuravlev A Y, Wood R A, Zhao F C, Sukhov S S. 2017a. A deep root for the Cambrian explosion: Implications of new bio- and chemostratigraphy from the Siberian Platform. Geology, 45: 459–462
Zhuravlev A Yu, Liñán E, Vintaned J A G, Debrenne F, Fedorov A B. 2012. New finds of skeletal fossils in the terminal Neoproterozoic of the Siberian Platform and Spain. Acta Palaeontol Polon, 57: 205–224
Zhuravlev A Yu, Wood R A. 1996. Anoxia as the cause of the mid-Early Cambrian (Botomian) extinction event. Geology, 24: 311–314

(责任编委: 沈树忠)